

*Zeitlupendarstellungen physikalischer Prinzipien mit
Schwerpunkt Wellenlehre*

Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Magisters der Naturwissenschaften

an der Karl-Franzens-Universität Graz

vorgelegt von

Milan Nemling

am Institut für Physik

Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dr. Gernot Pottlacher

Institut für Experimentalphysik

TU Graz

Graz, 2015

Sehr geehrte Online-Leser!

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Technik der Zeitlupenaufnahme als Mittel, schnell ablaufende Vorgänge bei physikalischen Experimenten und alltäglichen Vorgängen sichtbar zu machen. Im schriftlichen Teil dieser Arbeit werden die den Experimenten zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien und Phänomene erklärt, auch werden mathematische Zusammenhänge dargestellt und gegebenenfalls hergeleitet. Zu jedem Versuch des Kapitels „Experimente unter der Zeitlupe“ existiert ein Video, welches über das Online-Videoportal YouTube betrachtet werden kann. Zu diesen Videos gelangen Sie folgendermaßen:

1. Klicken Sie im Inhaltsverzeichnis auf den Titel des Experiments, zu welchem Sie Näheres erfahren wollen. Damit rufen Sie den entsprechenden Dokumentenabschnitt auf.
2. Klicken Sie auf den [Titel des Experiments](#), welcher am Beginn der Versuchsbeschreibung steht. Dieser wurde mit dem dazugehörigen Video auf YouTube verlinkt.

Viel Spaß beim Betrachten der Videos und der Lektüre dieser Arbeit wünscht

Milan Nemling

Einführung

Die Idee zu dieser Diplomarbeit stammt von Univ.-Prof. Dr. Gernot Pottlacher, welcher die Lehrveranstaltungen „Schulversuche II“ abhält. Ziel dieser Arbeit ist es, einige physikalische Prinzipien und Phänomene multimedial aufzubereiten und für Laien bzw. Schüler verständlich zu machen. Dabei handelt es sich besonders um Prinzipien und Phänomene, welche so schnell ablaufen, dass sie für das menschliche Auge zeitlich nicht auflösbar sind, weshalb sämtliche Versuche sowohl mit einer gewöhnlichen Digitalkamera als auch mit einer High-Speed-Kamera, welche sich im Besitz der TU Graz befindet, gefilmt wurden. Hierzu wurden zunächst einige besonders schnell ablaufende Versuche aus verschiedenen Bereichen der Physik ausgewählt. Besonderes Augenmerk legte ich als Musiker auf schwingende Körper und die Wellenlehre; so wurden grundlegende Prinzipien im Zusammenhang mit Wellen (Huygens'sches Prinzip, Brechung und Interferenz) ebenso multimedial aufbereitet wie Zeitlupendarstellungen schwingender Instrumententeile, z.B. Schlagzeugbecken, Trommelmembranen, Klangstäbe oder Klavier-, oder Geigensaiten. Im Zuge der Videoproduktion wurden die Filme mit Erklärungen der ablaufenden Vorgänge in deutscher Sprache versehen.

Im Internet sind zahlreiche Zeitlupenvideos verschiedener Experimente zu finden, physikalische Erklärungen hierzu findet man jedoch nur selten bzw. meistens in englischer Sprache. Deshalb sollen die hier produzierten Videos als homogene Sammlung von Zeitlupenvideos mit deutschen Kommentaren zu den physikalischen Hintergründen auf die Onlineplattform YouTube geladen und so der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden. Der schriftliche Teil dieser Arbeit dient mehreren Zwecken: einer kurzen Einführung in die High-Speed-Kameratechnik sowie der Dokumentation und eingehenderen physikalischen Interpretation der durchgeführten Versuche. Da darauf geachtet wurde, die Videos eher kurz zu halten (~ 3 min), soll auch dieses Dokument, welches eingehendere Erklärungen wie Formeln, Herleitungen usw. beinhaltet, über einen Link der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden.

Ohne die Hilfe und Unterstützung der folgenden Personen wäre diese Arbeit nicht in dieser Form zustande gekommen. Bedanken möchte ich mich deshalb...

... bei Univ.-Prof. Dr. Gernot Pottlacher für die ausgezeichnete Betreuung und dafür, dass ich den akademischen Alltag in seiner Arbeitsgruppe an der Technischen Universität Graz kennenlernen durfte.

... bei Univ.-Prof. Dr. Leopold Mathelitsch für die tolle Beratung und Betreuung des Kapitels „Experimente mit gestimmten Schlaginstrumenten unter Zuhilfenahme der High-Speed-Kamera“.

... bei Univ.-Prof. Mag. Gerhard Wanker für die Erlaubnis, Instrumente der Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz zu untersuchen.

... bei Dr. Roland Lammegger für die technische Unterstützung.

... bei Kirmanj Aziz und Alexander Schmon für die Hilfe, Beratung, und die interessanten Diskussionen.

... bei meinen Eltern und Großmüttern.

... bei Nadia Bouroyen, Magdalena Schreilechner und Manuel Franz, Johannes Thaler, Tobias Regelsberger und Andreas Biener, Martin und Andrea Werkovits, Manuel Hornicek, Oliver Stangl, Guido und Aron Knebl und Benedikt Würkner für die Hilfe bei den Versuchen und die Freundschaft.

Inhalt

1. Die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung / Wahrnehmung von Bewegungen	1
2. High-Speed-Imaging: Wie funktioniert das?.....	6
3. Experimente unter der Zeitlupe	26
3.1 Wellen und Schwingungen.....	26
Das Huygens'sche Prinzip - Wassertropfen	26
Stehende Welle – Wellenmaschine	29
Stehende Welle - Kundt'sche Röhre	32
Resonanzkreisel.....	36
Schwingende Klaviersaiten / Klaviersaiten in Resonanz	39
Lautsprecher in Bewegung – wie funktioniert ein Lautsprecher?	43
Die Kerze im Schallfeld	46
Chladnische Klangfiguren.....	50
Schlag auf Schlagzeugbecken	53
Schlag auf Snare-Drum	56
Gestrichene Geigensaiten – der Stick-Slip-Effekt.....	57
Anschlagen von Gitarrensaiten mittels eines Plektrums	60
3.2 Wasser – High Speed	62
Wassertropfen.....	62
Wasserballon	68
Wasserballon / Luftdruckprojektil.....	71
Tropfen auf der heißen Herdplatte – der Leidenfrost-Effekt.....	73
Tanzender Ballon	75
3.3 Feuer und Explosionen.....	78
„Löschen“ eines Fettbrandes	78
Wiederzünden der Kerze	81
Staubexplosion	84
Implosion eines Fernsehers	86
Explosionen: Wasserstoff vs. Methan	91
3.4 High Speed in der Natur.....	96
Die Spritzgurke (<i>Ecballium elaterium</i>) verteilt ihre Samen	96
High-Speed-Insekten: Die Italienische Schönschrecke (<i>Calliptamus italicus</i>) und die Gottesanbeterin (<i>Mantis religiosa</i>)	101
High-Speed-Holzspalten.....	103
3.5 Weitere High-Speed-Experimente.....	104
Elihu-Thompson-Versuch	104
Lichtbogenentladung – Jacob's Ladder.....	110

Glühlampe in Normalatmosphäre.....	115
Die Leuchtstoffröhre und ihr Starter	117
Brechende Spaghetti.....	122
Der „Becher-Kugel“-Versuch	126
4. Experimente mit gestimmten Schlaginstrumenten unter Zuhilfenahme der High-Speed-Kamera 131	
Einführung.....	131
Die Resonanz der Pauke.....	134
Die Resonanz der Steel-Drum.....	141
Marimbaphon und Vibraphon im Zeitlupenvideo	147
5. Quellenangaben	160
6. Bildnachweis	161
7. Referenzen.....	171

1. Die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung / Wahrnehmung von Bewegungen

Menschen und Tiere der Erde sind mit ihrer Umwelt über ihre Sinne verbunden – so funktionieren Kommunikation, Orientierung, Nahrungsbeschaffung und Partnersuche in der Natur über Sinnesorgane, welche sich in ihrer Komplexität und Ausgeprägtheit von Lebewesen zu Lebewesen unterscheiden. Einfachste Organismen besitzen zum Beispiel recht häufig einfache Fühlerapparate, welche auf chemischer bzw. molekularer Ebene funktionieren; höher entwickelte Lebewesen wie Vögel, Meeresbewohner oder Säugetiere auf dem Festland verfügen meist über mehrere höher entwickelte Sinnesorgane, welche je nach Lebensraum und Lebensweise unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Durch die Evolution, einen nie endenden Verwandlungsprozess, passen sich verschiedene Arten – egal ob Pflanzen oder Tiere – optimal ihrem Lebensraum an. Auch der Mensch unterliegt diesem Verwandlungsprozess. Seine Sinnesorgane haben ihre Empfindlichkeit und ihre Art der Wahrnehmung über die Jahrtausende und Jahrmillionen an seine Bedürfnisse angepasst. Wie das, und warum? Die für die sinnliche Wahrnehmung des Menschen wichtigen Körperteile – Ohren, Augen, Nase, Zunge und Haut – sind letztlich zuständig für die Umwandlung chemischer oder physikalischer Reize der Umwelt in ein Signal, welches in unser Hirn geleitet und dort verarbeitet werden kann. Da wir unsere Sinnesorgane nicht „abschalten“ können und somit ständig Reize aufgenommen werden, ist ein großes Potential an Reizen vorhanden. Nun haben sich die menschlichen Sinnesorgane durch die erwähnte Evolution so entwickelt, dass wir nur auf bestimmte Reize reagieren, nur bestimmte Dinge hören, sehen, schmecken usw. Der Wahrnehmungsbereich unserer Sinnesorgane ist also physisch eingegrenzt, dadurch werden Teile der Umwelt, welche für unser (Über-)Leben von geringerer Bedeutung sind, ausgeblendet, damit wir uns auf für uns Wesentlicheres konzentrieren können; es passiert also eine gewisse Reizselektion noch vor dem Gehirn, welches dann weitere Selektionen vornimmt.

Unser Ohr wandelt zum Beispiel winzig kleine, sehr rasch aufeinanderfolgende Druckschwankungen, welche sich weit durch die Luft (als häufigstes und wichtigstes Medium) fortpflanzen, in vom Gehirn verwertbare Signale, welche durch chemische Prozesse erzeugt werden und im Grunde genommen sehr kleine elektrische Ströme darstellen. Diese Druckschwankungen, welche wir als Schallwellen bezeichnen, dürfen, damit sie für uns hörbar sind, bestimmte Frequenz- bzw. Wellenlängenwerte nicht über- oder unterschreiten. So hört ein Neugeborenes in einem Frequenzbereich von 20 Hz bis 20000 Hz; diese obere Hörgrenze sinkt

mit den Jahren immer weiter ab, als Faustregel für die Hörgrenzenverschiebung wird hierbei der Wert 2 kHz / Lebensjahrzehnt, nach anderen Quellen 1 kHz / Lebensjahrzehnt ab einem Alter von 20 Jahren angenommen. Schallwellen, welche oberhalb dieser 20000-Hz-Grenze liegen, werden dem „Ultraschall“ zugeordnet. Ultraschall findet in der medizinischen Diagnostik sowie in vielfältiger Form in der Technik (Sonar, Werkstoffprüfungen, Reinigungsvorgänge) Anwendung. Der spektrale Bereich unterhalb der unteren Hörgrenze von 20 Hz wird als „Infraschall“-Bereich bezeichnet. Infraschall umfasst somit Frequenzen von 0 – ca. 20 Hz und tritt z.B. bei Erdbeben zutage, auch bestimmte Orgelmodelle sind zu Tönen im Infraschallbereich fähig. So „klingt“ das Subsubkontra-C mit einer Frequenz von 8,2 Hz. Die Hörgrenzen des Menschen sind so abgestimmt, dass z.B. die Kommunikation untereinander mittels der menschlichen Stimme problemlos möglich ist; für diesen Frequenzbereich ist das menschliche Ohr sogar besonders empfindlich – andere Lebewesen kommunizieren (und navigieren!) mittels Schallwellen, welche bedeutend höhere Frequenzen aufweisen, so zum Beispiel Wale und Fledermäuse. Doch auch geläufigere Säugetiere wie Hunde, Katzen oder Wildtiere sind imstand, Signale mit viel größeren Frequenzen als den erwähnten 20000 Hz zu verarbeiten.

Auch unser Auge wirkt als „Wandler“ von Signalen, welche in Form von Licht auf unsere Netzhaut treffen, zu winzigen elektrischen Signalen, welche unser Gehirn verarbeiten kann. Doch was ist „Licht“ eigentlich?

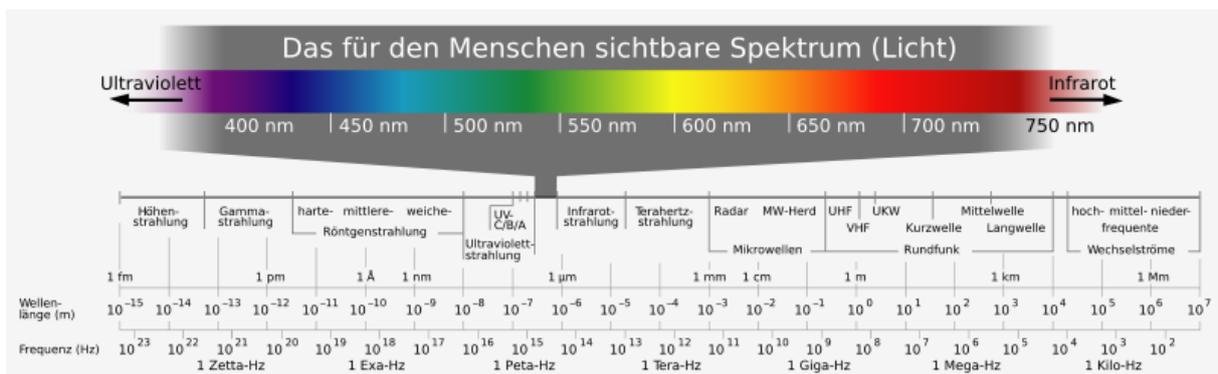


Abb. 1: Elektromagnetisches Spektrum mit Kennzeichnung des für den Menschen sichtbaren Bereichs

Der umgangssprachliche „Licht“-Begriff bezeichnet jenen Bereich des Spektrums elektromagnetischer Wellen, den wir sehen können. Denn wie auch beim Ohr ist unser Auge längst nicht für alle Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums gleichermaßen empfindlich; beim Betrachten des Spektrums in Abb. 1 zeigt sich, dass der für uns als Licht sichtbare Bereich sogar recht eng ist. So vermag unser Auge elektromagnetische Wellen mit

Wellenlängen von ca. 380 nm – ca. 780 nm zu verarbeiten. Der unmittelbar an die obere Wellenlängengrenze (bzw. untere Frequenzgrenze) angrenzende Bereich wird als Infrarot bezeichnet; dieser Bereich tritt für uns zwar nicht mit freiem Auge sichtbar, jedoch spürbar als Wärme zutage. Der Wellenlängenbereich, welcher unterhalb an die 380 nm-Grenze angrenzt, wird als „Ultraviolett“-Bereich bezeichnet. Der für uns sichtbare Wellenlängenbereich deckt sich mit einem Teil des Spektrums unserer wichtigsten Licht- (und Energie-) -Quelle: der Sonne. Das Spektrum des Sonnenlichts in Vergleich mit dem für uns sichtbaren Spektralbereich wird im Versuch „Glühlampe in Normalatmosphäre“ näher beschrieben.

Eine weitere Einschränkung unseres Sehapparats betrifft die zeitliche Auflösung von Bildern – der Mensch kann pro Sekunde nur eine bestimmte Anzahl von Bildern in seinem Gehirn verarbeiten, abhängig von verschiedenen Umwelt- / Lichtbedingungen. So sind bewegte Objekte für uns nur als kontinuierlich bewegt erkennbar, wenn hinsichtlich der Umwelt- / Lichtbedingungen sowie der Art / Geschwindigkeit der Bewegung einige Voraussetzungen erfüllt sind. Die Sichtbarmachung von Vorgängen bzw. Bewegungen von Objekten, welche so schnell ablaufen, dass der Mensch ohne technische Hilfsmittel zu deren optischer Auflösung nicht fähig ist, ist das Thema dieser Diplomarbeit.

Zunächst erörtern wir, was der Mensch denn eigentlich als Bewegung wahrnimmt.

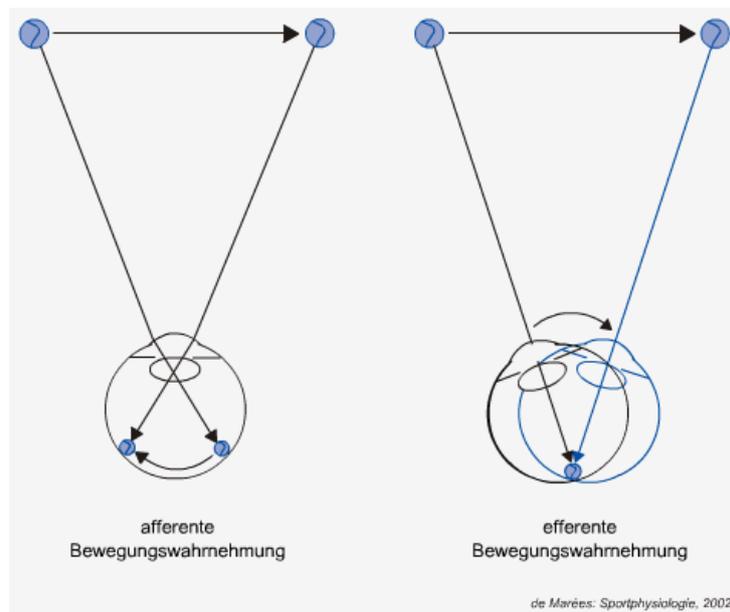


Abb. 2: Arten der Wahrnehmung von Bewegung

Wir erfassen „Bewegung“ mit dem Auge als einen Ortswechsel von Objekten oder von uns selbst innerhalb eines zeitlich eingegrenzten Rahmens. Zur Erfassung eines solchen Ortswechsels existieren zwei Möglichkeiten, welche in Abb. 2 dargestellt werden. Im linken Bildteil sehen wir die „afferente Bewegungswahrnehmung“ skizziert; bei dieser Art der Wahrnehmung von Bewegungen bleibt das Auge starr, es verfolgt das sich bewegende Objekt nicht. Mit der Bewegung des Reizes bewegt sich auch dessen Bild auf der Netzhaut, was wir als „retinale Bewegung“ bezeichnen. Die Geschwindigkeit dieser retinalen Bewegung ist von entscheidender Bedeutung für die Wahrnehmung von Bewegung. Das Bild eines sich schnell bewegenden Reizes überstreicht die Sensoren der Netzhaut recht schnell; auch funktioniert räumliche Auflösung im Randbereich der Netzhaut nicht so gut wie im Zentrum. Deshalb empfinden wir solcherart „empfangene“ Bilder häufig als unscharf. In der Abb. 2 sehen wir die retinale Bewegung als Folge der Reizbewegung illustriert.

Eine andere Art der Bewegungswahrnehmung ist die „efferente Bewegungswahrnehmung“. Hierbei verfolgt der Beobachter das bewegte Objekt durch Bewegung des Auges bzw. Drehung des Kopfes. Dies ermöglicht die bessere „Fokussierung“ des Auges auf das Objekt, der Reiz bewegt sich so nicht bzw. nur wenig über die Netzhaut, sondern bleibt auf einem bestimmten Punkt, idealerweise der Fovea centralis (eine kleine Vertiefung in der Netzhaut), abgebildet, was schärfere Bilder ermöglicht. Der Vorgang der „efferenten Bewegungswahrnehmung“ ist in der rechten Bildhälfte der obigen Abbildung schematisch dargestellt. Nun ist für die Erfassung von Bewegung die Geschwindigkeit des Reizes von großer Bedeutung. Wie wir im Bild oben erkennen können, spannt der bewegte Reiz einen Winkel mit der Linse (afferente Wahrnehmung) bzw. mit der Netzhaut (efferente Wahrnehmung) auf. Dieser Winkel wird als „Schwinkel“ bezeichnet, die Geschwindigkeit, mit der sich der Winkel aufspannt ist direkt auf die Geschwindigkeit des sich bewegenden Reizes zurückzuführen und trägt die Einheit „Schwinkel / s“. Mit dieser Einheit können wir vom Auge erfasste Bewegungen „messen“ bzw. definieren, welche Winkelgeschwindigkeit nicht über- bzw. unterschritten werden darf, um erfasste Bewegung als kontinuierlich zu empfinden. Für den Wert des Schwinkels / s sind Reizgeschwindigkeit und –entfernung von Bedeutung – je langsamer bzw. weiter entfernt der Reiz, desto geringer seine Winkelgeschwindigkeit. Als Untergrenze bei der Erfassung von Bewegung gilt ein Wert von 0,33 Schwinkel / s. Reize, welche sich langsamer bewegen, „stehen“ in unserer Wahrnehmung. Reize, welche sich sehr schnell bewegen, können wir nicht mehr adäquat abbilden; eine solche Bewegung empfinden wir nicht als kontinuierlich. Ab einem Wert von ca. 120 Schwinkel / s versuchen wir automatisch, eine „Mischform“ der Bewegungswahrnehmung anzuwenden; hierbei bewegt sich das Auge ruckartig mit den

vorbeiziehenden Reizen mit. Wir kennen dies von Menschen, welche während einer Zugfahrt aus dem Fenster blicken.

Auch müssen bei der Erfassung von Bewegung äußere Umstände wie z.B. die herrschenden Lichtverhältnisse berücksichtigt werden; laut einer Definition des amerikanischen Wahrnehmungsforschers Junius Brown kann bei ausreichender Beleuchtung ein 2 m vom Auge entfernter kontrastreicher Reiz mit einer Größe von 8 mm² als bewegt erkannt werden, wenn er sich mit mindestens 2 mm / s bewegt.

Bei Geschwindigkeiten > 150 cm / s wird es für uns hingegen schwierig, das Objekt zu erkennen. Hier kommt die „Bildrate“ des Auges ins Spiel. Das menschliche Auge ist fähig, pro Sekunde 18 – 24 Bilder aufzunehmen und als Nervenreiz ans Gehirn zu übermitteln. Reize, welche so schnell aufeinanderfolgen, dass eine höhere zeitliche Auflösung notwendig wäre, können nicht mehr als voneinander getrennt wahrgenommen werden; ebenso kann ein sich sehr schnell bewegendes Objekt nicht mehr in seiner Bewegung verfolgt werden. Die hierbei maßgebliche Bildrate wird „Flimmerfusionsfrequenz“ genannt und bezeichnet die zeitliche Auflösungsgrenze bei Augen verschiedener Lebewesen.

Die Bildrate des menschlichen Auges liegt weit unterhalb jener einiger anderer Lebewesen. Verschiedene Vogelarten sind nicht nur imstande, UV-Licht zu sehen, sondern können auch ca. 200 Bilder pro Sekunde verarbeiten, was die rasche Reaktion auf Bewegungen von Beutetieren oder Gegnern ermöglicht. Bedingt durch die höhere Bildrate der Augen von Vögeln sollte man bei deren Haltung als Nutztiere (z.B. Hühner, Enten usw.) berücksichtigen, dass Lichtquellen, welche für den Menschen kontinuierlich leuchten, für Vögel ein flackerndes Licht emittieren, was für die Tiere sicherlich unangenehm ist. Auch das Facettenauge von Insekten ist zu einer sehr hohen zeitlichen Bildrate (ca. 300 Bilder / s) fähig. Facettenaugen bestehen aus vielen kleineren Einzelaugen (Ommatidien); das Bild ergibt sich für die Fliege aus einzelnen, von diesen Ommatidien aufgenommenen Farbpunkten. Grundsätzlich ist der Sehsinn von Insekten stark auf bewegte Objekte ausgerichtet, was durch die hohe zeitliche Bildauflösung unterstützt wird. So ist es, wie wir wissen, recht schwierig, eine Fliege mit der Hand zu erschlagen, weil diese die Hand kommen sieht und schnell genug reagieren kann, um aus dem Bereich der auftreffenden Handfläche zu entkommen. Räuberische Insekten wie die Gottesanbeterin vermögen mithilfe ihrer Facettenaugen jede Bewegung eines potentiellen Beutetieres zu bemerken und darauf zu reagieren.

Dem Menschen ist, wie wir gesehen haben, die Verfolgung schnell ablaufender Prozesse nicht so einfach möglich. High-Speed-Kameras nehmen Filme mit hohen Bildraten auf, welche dann, langsamer abgespielt, schnelle Vorgänge auf ein dem Auge genehmes Tempo verlangsamen, ohne dass dadurch ein „ruckelnder“ Eindruck entsteht und die Bewegungen im Film als kontinuierlich empfunden werden. Funktionsweise und Einsatzbereiche solcher Kameras werden im nächsten Kapitel erklärt.

2. High-Speed-Imaging: Wie funktioniert das?

Im nun folgenden Abschnitt soll näher auf technische Aspekte und Varianten von High-Speed-Kameras, deren Einsatzbereiche und die Geschichte der Entstehung von High-Speed-Kameras eingegangen werden. High-Speed-Kameras sind zur Beobachtung sehr schnell ablaufender Vorgänge unerlässlich geworden; das menschliche Auge kann, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, nur eine recht geringe Anzahl von Bildern pro Sekunde verarbeiten. Um komplexe Vorgänge, welche sich innerhalb kurzer Zeit abspielen, zu veranschaulichen, werden die relevanten Zeitspannen in Filmen häufig gestreckt. Wir kennen dies als Zeitlupe von verschiedenen Sportberichten im Fernsehen. Nun verarbeiten auch Fernsehkameras nur eine relativ geringe Anzahl von Bildern, gerade so viel, dass der Mensch die Bewegungen im abgespielten Film als kontinuierlich empfindet und nicht als Aneinanderreihung von Standbildern. Tatsächlich zeigen Zeitlupensequenzen aus älteren Sportsendungen häufig das „Ruckeln“, welches auf eine geringe zeitliche Bildrate zurückzuführen ist – moderne Fernsehkameras verarbeiten mehr Bilder pro Sekunde, sodass auch Zeitlupenaufnahmen von Sportereignissen heutzutage als kontinuierliche Bewegung erscheinen. Was aber, wenn sich ein Ereignis innerhalb einer viel kürzeren Zeitspanne als der eines Fouls beim Fußball abspielt? Verschiedene chemische Reaktionen, Explosionen, bestimmte Ereignisse in der Natur oder schwingenden Musikinstrumente sind visuell nur mit viel höherer Zeitauflösung anschaulich darzustellen. Nun ist die Technik gefragt. Es gilt, Methoden zu entwickeln, Bilder so schnell aufzunehmen und zu speichern, dass eine spätere stark zeitverzögerte Wiedergabe als kontinuierlicher Film erscheint. Wie dies auf verschiedene Arten gelingt, wird in diesem Kapitel beschrieben.

Auch wird ein wenig Einblick in die eng verwandte Technik der High-Speed-Fotografie gegeben. Letztlich ist die Problemstellung bei Film und Fotografie die gleiche: ein sehr schnell ablaufender Vorgang bzw. eine Bewegung eines Gegenstands, der sich währenddessen möglicherweise auch in seiner Erscheinung verändert, soll detailgetreu und mehrmals innerhalb kurzer Zeitabstände festgehalten werden. Nun muss man einerseits die Mechanik der Kamera dahingehend modifizieren, dass diese imstande ist, sehr oft pro Sekunde (oft mehrere 1000 – 100 000 mal) zwischen „Belichten“ und „Nicht Belichten“ abzuwechseln. Andererseits muss auch gewährleistet sein, dass nicht doppelt belichtet wird, sondern der Film zwischen den Belichtungssequenzen rasch genug weiterbewegt bzw. der Chip geleert und für neue Belichtung bereit gemacht wird. Deshalb werden im Folgenden die verschiedenen Lösungsansätze dieser beiden Problemstellungen erläutert.

Bevor wir die verschiedenen Aufnahmetechniken betrachten, führen wir eine Einheit ein, welche in dieser Arbeit sehr häufig vorkommt:

fps = frames per second

Frames per second (dt. „Bilder pro Sekunde“) steht für die Anzahl von Bildern, welche eine Kamera pro Sekunde aufnimmt bzw. ein geeignetes Wiedergabegerät pro Sekunde wiedergibt. Ein typischer Wert für Aufnahmesequenzen, welche im Fernsehen wiedergegeben werden, ist 30 fps – da das menschliche Gehirn zwischen 18 und 25 Bildern pro Sekunde verarbeiten kann, reicht dies zur Erzeugung des Eindrucks von Kontinuität leicht aus. Strecken wir jedoch die Wiedergabedauer, sodass ein Film, welcher mit 30 fps aufgenommen wurde, nur mit 15 fps wiedergegeben wird (entspricht zweifacher Zeitlupe), so empfinden wir die dargestellten Bewegungen nicht als kontinuierlich. Filme, welche mit 30 fps aufgenommen werden, sind also zur Erstellung von Zeitlupenaufnahmen nur bedingt geeignet. Hierin liegt der entscheidende Vorteil von High-Speed-Kameras: eine Filmsequenz, welche mit 600 fps aufgenommen wurde, kann mit 30 fps wiedergegeben werden und erzeugt so einen kontinuierlichen Eindruck bei einer 20-fachen Verlangsamung gegenüber der Aufnahmebildrate, also einer 20-fachen Zeitlupe!

Im Folgenden werden wir die Geschichte der Entwicklung der High-Speed-Fotografie und des –Films näher kennenlernen, weiters werden wir technische Aspekte (Belichtung und Speicherung/Verarbeitung) näher betrachten.

High-Speed-Fotografie und –Filme in der Geschichte:

Schon bald nach der Erfindung der Fotografie wurde versucht, auch rasch bewegte Körper in scharfen Bildern darzustellen. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde der Kameraverschluss (Shutter), dessen Öffnung den Film dem Umgebungslicht aussetzte, manuell betätigt, weshalb keine sehr kurzen Belichtungszeiten (im ms – Bereich) erreicht werden konnten, damals das Hauptproblem der Hochgeschwindigkeitsfotografie. Bewegte Motive bewegen sich natürlich auch während der Belichtungszeit – unscharfe Bilder sind die Folge. Der englische Fotopionier William Henry Fox Talbot suchte nach einem Weg, sehr schnelle Bewegungen scharf abzubilden und entwickelte 1851 die folgende Methode: Im Experiment ließ er ein Zeitungsblatt auf einer Scheibe schnell rotieren, sodass die Schrift mit freiem Auge nicht erkennbar war. Dann wurde der Experimentierraum gut abgedunkelt und der Kameraverschluss geöffnet. Mittels eines Blitzes aus einer elektrischen Entladung wurde der Film belichtet. Diese Entladung ermöglichte eine Belichtungszeit, die so kurz war, dass sich die Drehscheibe während der Belichtungszeit so wenig fortbewegte, dass die Schrift am Foto scharf erschien. Durch die kurze Belichtungszeit wurde die Herstellung empfindlicher Fotoplatten notwendig. Die verfügbaren Fotoplatten waren nicht sehr lichtempfindlich und bedurften recht langer Belichtung (auch mehrere Sekunden), weshalb das manuelle Öffnen und Schließen des Shutters in der „alltäglichen“ Fotografie kein Problem war. Die Herstellung der empfindlichen Platten wird im „Polytechnischen Band“ von 1852 folgendermaßen beschrieben:

„Ich beschreibe nun die Methode, wodurch ich den Glasplatten die große Empfindlichkeit ertheilen konnte welche zum Gelingen dieses Versuchs erforderlich ist.

1. Man nimmt den klarsten Theil vom Weißen der Eier, vermischt ihn mit seinem gleichen Volum Wasser, überzieht damit die Glasplatte so gleichförmig als möglich, und trocknet sie dann gut am Feuer. Selbst eine starke Wärme welcher diese erste Schichte ausgesetzt wird, ist nicht schädlich. Die getrocknete Eiweißschicht muß kaum sichtbar seyn.

2. Man versetzt eine wässerige Auflösung von salpetersaurem Silber mit Alkohol in starkem Verhältniß, so daß nur drei Gran Silbersalz in einer Unze der geistigen Mischung enthalten sind. Ich habe mehrere Verhältnisse versucht, von einem Gran bis zu sechs, und bin bei der Zahl von drei Gran stehen geblieben; ich komme unten darauf zurück, denn das Verhältniß hat einen großen Einfluß auf das Resultat.

... „ [1]

Dies ist nur der Beginn der Anleitung zur Herstellung der Fotoplatten; es sind noch etliche Chemikalien und physikalische Verfahren notwendig. Man kann sich vorstellen, dass die Herstellung fotoempfindlichen Materials in Handarbeit einige Übung, Geduld und Hingabe erforderte.

Die Erfindung dieser Variante der High-Speed-Fotografie ist übrigens nicht die einzige Pionierleistung von William Talbot; mit der Erfindung der Positiv-Negativ-Technik, welche auch heute noch in abgewandelter Form angewandt wird, ging er in die Geschichte ein.

Im Jahre 1872 wurde der englische Fotograf Eadweard Muybridge vom kalifornischen Gouverneur (und Gründer der Stanford-Universität) Leland Stanford beauftragt, festzustellen, ob ein galoppierendes Pferd zu bestimmten Zeitpunkten keinen Huf am Boden hat. Zu dieser Zeit war die mechanische Shuttertechnik so weit fortgeschritten, dass eine Verschlusszeit von $1/1000$ s bei Fotoapparaten realistisch wurde. Muybridge behalf sich daher mit einer Anordnung aus 12 Kameras, deren Auslöser an auf dem Boden verlaufende Drähte gekoppelt war. Bei Berührung der Drähte durch das Pferd lösten diese die angekoppelten Kameras aus, was eine Bildreihe von 12 Bildern erzeugte. Damit wurde die eingehende Analyse einer schnell ablaufenden Bewegung (Galopp eines Pferdes) ermöglicht und außerdem ein Stück bekannter Fotokunst erzeugt:

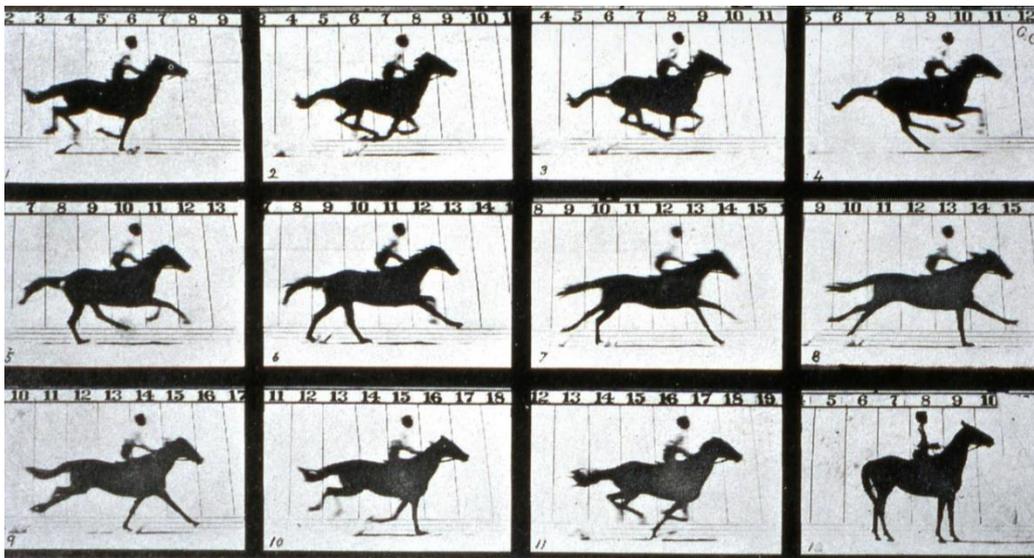


Abb. 3: Die fotografische Analyse des Pferdegallops von Muybridge

Die Technik der Belichtung:

Die Shuttertechnik ist, wie erwähnt, die ursprünglichste Art der Belichtung. Durch das Schließen des Shutters wird der Lichteinfall unterbrochen, dann wird der Film weiterbewegt bzw. der Chipspeicher geleert, um Platz für eine neue Aufnahme zu schaffen. Gearbeitet wird heute mit mechanischen oder elektronischen Shuttern.

Mechanische Shutter werden mittels optischer Barrieren vor der Linse realisiert. Diese können für eine durch den Benutzer definierte Zeitspanne so bewegt werden, dass Licht auf den Film bzw. den lichtempfindlichen Chip fällt. Sich bewegende Shutter erzeugen das klassische Klicken beim Auslösen von Spiegelreflexkameras. Für die High-Speed-Aufnahme sind mechanische Shutter weniger geeignet, da die Belichtungssequenzen sehr schnell aufeinander folgen müssen und dies mechanisch schwerer realisierbar ist.

Bei früher häufigen analogen Filmkameras wurden mechanische Shutter mittels einer durchlöcherten Drehscheibe realisiert, welche sich vor dem bewegten Film drehte und diesen in gleichmäßigen Zeitabständen zur Belichtung freigab.

Elektronische Shutter sind rein elektronisch ausgeführt und nur bei Digitalkameras in Gebrauch. Beim elektronischen Schließmechanismus wird die Belichtungszeit dem Chip auf elektronischem Wege mitgeteilt. So wird dann für die Dauer der vorbestimmten Belichtungszeit Information aufgenommen. Ist diese Belichtungszeit verstrichen, so beendet der Chip die Aufnahme selbstständig. In hochwertigen Digitalkameras werden häufig elektronische mit mechanischen Shuttern kombiniert, da bei der alleinigen Anwendung elektronischer Shutter häufig Störungen aufgrund des andauernden Lichteinfalls eintreten können.

Funkenzeitlupe:

Die Technik der Funkenzeitlupe wurde 1929 von den deutschen Physikern Carl Cranz und Hubert Schardin entwickelt. Hierbei werden 24 Blitze so geschaltet, dass sie in sehr rascher Abfolge hintereinander zünden und 24 genau auf die Einfallsrichtung und den Einfallszeitpunkt der Blitze abgestimmte Kameras mit den Blitzen auslösen. Ein sich durch die Blitzebene bewegendes Objekt kann so in seiner Bewegung verfolgt werden. Das so genannte „Cranz-Schardin-Verfahren“ wird auch heute noch angewandt. Die damals verwendete Technik wurde natürlich von moderneren Anordnungen abgelöst – so werden heute extrem lichtstarke Laser zur Belichtung verwendet. Diese Laser werden gepulst betrieben, ein solcher Laserpuls kann nur etwa 5 ns dauern (=0,000000005s!!!), die Belichtungsdauer kann also stark reduziert werden, was eine Erhöhung der Bildrate ermöglicht.

Auch werden zur Aufnahme natürlich keine Filme oder Fotoplatten mehr verwendet, sondern CCD-Sensorchips.

Belichtung mittels eines Blitzes:

Der amerikanische Wissenschaftler Harold Edgerton forschte in den 40er-Jahren für die US Army an Möglichkeiten, das Auftreffen bzw. Durchtreten von Projektilen zu untersuchen. Nun bewegen sich die Projektile z.B. eines Gewehrs sehr schnell – mit der zur Zeit des 2. Weltkriegs verfügbaren Kameratechnik bzw. den damals möglichen Verschlusszeiten (1/1000 s) war es nicht möglich, ein abgeschossenes Projektil scharf abzubilden. So behalf sich Edgerton mit einem Trick, der der Talbot'schen Methode stark ähnelte: Er führte seine Experimente in einem völlig dunklen Raum durch und ließ den Verschluss der Kamera dabei immer offen. Im jeweilig relevanten Moment, z.B. genau beim Durchtritt einer Gewehrkugel durch einen Apfel, erhellte ein Stroboskoplicht den Raum für sehr kurze Zeit, während welcher der Film belichtet wurde. So erreichte Edgerton „Verschlusszeiten“ von $1/10^6$ s!

Kerr-Zellen-Belichtung:

Auch diese Methode der Belichtung wurde von Harold Edgerton angewandt, in besonders eindrucksvoller Weise zur Dokumentation von Atombombentests im Jahre 1952.

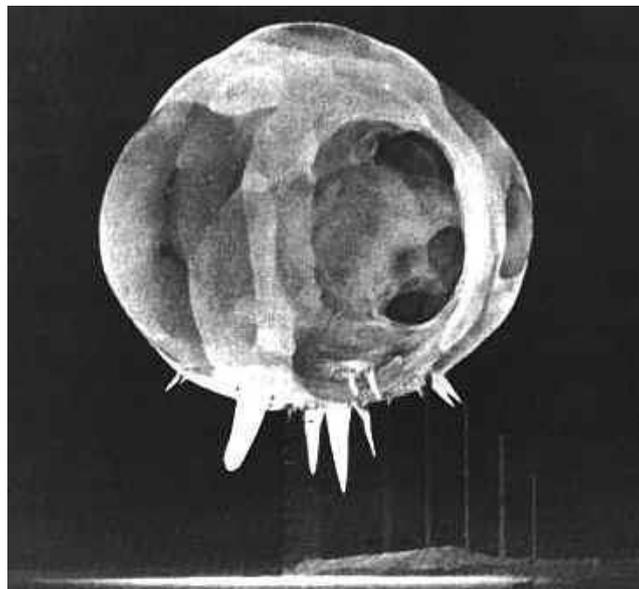


Abb. 4: Feuerball einer Atombombenexplosion,
1 ms nach Beginn der Reaktion.
Aufnahme einer Kerr-Zellen-Kamera (Rapatronic-Kamera)

Die Kerr-Zellen-Belichtung basiert auf dem Kerr-Effekt, der von John Kerr im Jahre 1875 beschrieben wurde: legt man an bestimmte Materialien bzw. Flüssigkeiten (z.B. Nitrobenzol) eine Spannung an, so ändern sie ihre optischen Eigenschaften. So können diese Materialien zum Beispiel als Polarisationsmodulatoren verwendet werden. Edgerton machte sich dies zunutze, indem er zwei gegeneinander um 90° gedrehte Polarisationsfilter hintereinander setzte und dazwischen eine Kerr-Zelle installierte. Lag keine Spannung an der Kerr-Zelle, so drehte der erste Polarisator das einfallende Licht, welches durch die Kerr-Zelle hindurch auf den zweiten Polarisator traf und von diesem nicht durchgelassen wurde. Lag für kurze Zeit eine Spannung an der Kerr-Zelle, so drehte diese die Polarisationsrichtung des von der ersten Zelle polarisierten Lichts, sodass dieses auch vom zweiten Polarisationsfilter durchgelassen wurde. Dieser Effekt spricht so schnell auf eine angelegte Spannung an, dass Verschlusszeiten im Nanosekundenbereich (~ 10 ns und darunter) erreicht werden können. Dies entspricht Werten, welche mit konventionellen (mechanischen) Shuttern nicht realisierbar sind.

Auch Prof. Gernot Pottlacher von der TU Graz verwendete im Rahmen seiner Dissertation „Bestimmung thermophysikalischer Daten von Metallen bis in den Überhitzungsbereich der flüssigen Phase“ die Kerr-Zellen-Technik, um das Verhalten stark aufgeheizter und so verflüssigter Drahtproben zu dokumentieren. Er arbeitete hierbei mit Belichtungszeiten von ca. 30 ns; bedingt durch die kurze Belichtung mussten die verwendeten Filmmaterialien vorbelichtet werden, um brauchbare Aufnahmen zu erhalten. Die Skizze des von Prof. Pottlacher verwendeten Aufbaus illustriert die Funktionsweise einer solchen Kamera recht gut:

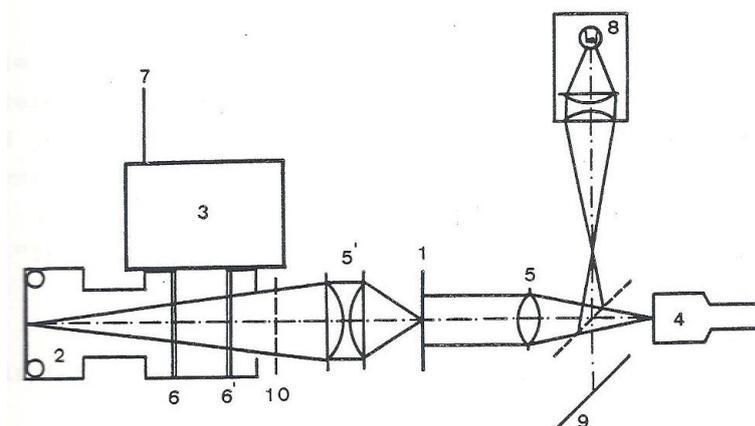


Abb. 5: Aufbau einer Kamera mit Kerr-Zellen-Belichtungstechnik

In Abb. 5 sehen wir nummeriert die folgenden Bestandteile der Kerr-Zellen-Kamera:

1. Drahtprobe (Untersuchter Gegenstand)
2. Kamergehäuse

3. Verschlusssteuerung
4. Hintergrundblitz
5. Linsen
6. Kerrzellenverschlüsse mit Polarisationsfiltern
7. Leitung für elektrischen Auslöseimpuls
8. Justierlampe
9. Spiegel
10. Streuscheibe [2]

Die Drahtprobe wird mit Hilfe der Abbildungslinse auf die Filmebene der Kamera abgebildet. Mit der Lampe kann bei geöffneten Polarisationsfiltern der optische Aufbau justiert werden. Auch muss das verwendete Filmmaterial vorbelichtet werden; hierzu wurde das Bild des Drahtes mittels des Hintergrundblitzes durch die Streuscheibe defokussiert, und die Fotoscheibe belichtet, ohne jedoch die Entladung zu zünden [3].

Es konnte nur eine Aufnahme pro Experiment getätigt werden, deshalb musste das Experiment, um zeitlich veränderliche Vorgänge zu dokumentieren, mehrmals durchgeführt werden, wobei dann zu verschiedenen Zeitpunkten die Kerr-Zellen-Kamera auslöste.

„Schmieraufnahmen“:

Mittels einer Schmierkamera kann man zeitaufgelöste Darstellungen von Ereignissen, welche an einem Ort passieren, herstellen. Diese Form der Hochgeschwindigkeitsfotografie wird und wurde besonders im experimentellen Umfeld bzw. Labors eingesetzt; so lässt sich zum Beispiel die zeitliche Entwicklung einer Entladung oder Explosion an einem Ort mit beliebiger Zeitauflösung dokumentieren. Am Beispiel einer Explosion werden wir das Funktionsprinzip von Schmierkameras erläutern.

Mittels einer Spaltblende wird der gewünschte Ort, an dem man die Explosion dokumentieren möchte, ins Visier genommen. Hinter der Spaltblende befindet sich eine Linse, welche das durch den Spalt tretende Licht auf einen dahinter laufenden Film oder einen Sensorchip, welcher die empfangenen Daten ausliest. Je nach Filmgeschwindigkeit bzw. Auslesegeschwindigkeit des Chips kann man so die Zeitauflösung variieren – je schneller z.B. der Film sich bewegt, umso höher ist die Zeitauflösung. Hierbei ist natürlich darauf zu achten, dass die Helligkeit des Ereignisses groß genug ist, dass auch kurze Belichtung auf ein Stück Film noch annehmbare Ergebnisse bringt.

Ebenso ist es möglich, nicht den Film zu bewegen, sondern das Licht mittels eines Drehspiegels über eine fotoempfindliche Oberfläche zu bewegen. Grundsätzlich hat man die Möglichkeit, die Belichtungszeiten mittels Veränderung der Spaltbreite oder Veränderung der Film- bzw. Drehspiegelgeschwindigkeit zu verändern.

Prof. Neger von der TU Graz arbeitete im Rahmen seiner Dissertation „Relative Übergangswahrscheinlichkeiten und Stark-Effekt-Breiten von CU-I und CU-II-Linien“ mit einer solchen Anordnung, deren Funktion er eingehend beschreibt.

Er verwendete überdies auch einen Spektrographen, um Momentspektren des Entladungsverlaufs an einem beliebigen Ort durchführen zu können.

Hierfür wurde das Spaltbild mittels des Drehspiegels über den Spektrographenspalt geschmiert. Je nach Zündzeitpunkt und Drehspiegelstellung kann man so beliebige Entladungszeitpunkte herausgreifen und spektrographisch darstellen.

Die Anwendungsmöglichkeiten einer solchen Schmierkameraanordnung mögen begrenzt sein; aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften im Einsatz bei Experimenten wird sie hier dennoch angeführt, da hier auf recht einfache Weise mittels eines originellen Prinzips ein „Zeitlupeneffekt“ erzeugt werden kann.

Drehprismenbelichtung:

Bei dieser analogen Variante der Belichtung wird das Licht durch ein sich drehendes Prisma geführt. Gleichförmig mit dem Prisma bewegt sich auch der hinter dem Prisma liegende, sich bewegende Film. Die Gleichförmigkeit der Bewegung der beiden Elemente muss sehr genau eingehalten werden, da es sonst zu Bildfehlern (Verschmierungen) kommen kann. Die fortlaufende Filmbewegung, gepaart mit dem sich drehenden Prisma bedingt, dass der Film nicht mehr zur Belichtung angehalten werden muss, was einige Zeit spart und die mechanische Belastung des Films verringert, da dieser nicht immer abgebremst und wieder beschleunigt werden muss.

Mittels der Drehprismenbelichtung können Bildraten von bis zu 10 000 fps erreicht werden, was bei Betrachtung mit 30 fps einer mehr als 300-fachen Zeitlupe entspricht. Aus einer Sekunde Filmzeit werden so fünf Minuten Betrachtungszeit – man kann sich vorstellen, dass hierbei immense Daten- bzw. Filmmengen anfallen (Näheres hierzu im Abschnitt über die Speicherung). Abb. 6 verdeutlicht die Funktionsweise einer Drehprismenkamera.

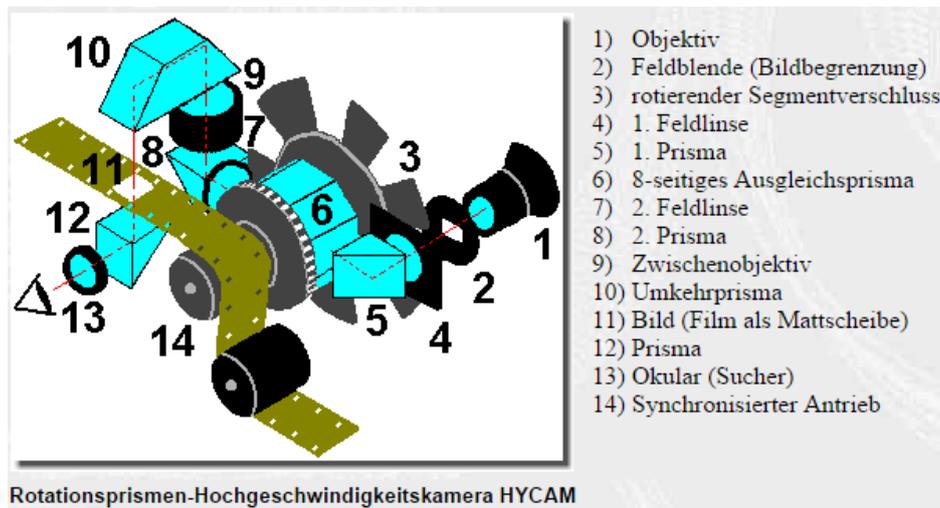


Abb. 6: Funktionsschema einer HYCAM-Drehprismenkamera

Das optische Signal dringt über das Objektiv in das Innere der Kamera ein. Hier besteht eine Anordnung aus verschiedenen Ablenkprismen und einer Prismentrommel mit 8 Prismen, welche die Rolle des Shutters (Trennung von Bildern) übernimmt. Der Film bewegt sich fortwährend, durch ein Okular bzw. den Sucher kann man die Aufnahme verfolgen bzw. die Kamera auf ein Motiv einstellen.

Trommelbelichtung:

Bei der Trommelkamera wird ein Film auf eine rotierende Trommel aufgezogen. So wird der Film rasch am Objektiv vorbeibewegt. Die Belichtung des Films erfolgt nicht wie bei den bisher gezeigten Kameras mittels eines Schließmechanismus oder eines drehenden Spiegels oder Prismas, sondern extern. Das heißt, dass die Kamera während der ganzen Zeit „offen“ und damit belichtungsbereit ist und die Zeitpunkte der Belichtung mittels einer geeigneten Lichanlage von außen bestimmt werden. So wird die Trommelkamera in völlig dunklen Räumen verwendet; während des Experiments belichten dann sehr rasch auslösende Blitze (Lichtimpulsdauer bis zu $1/10^8$ s, sehr hohe Impulsfrequenzen) den Film. Somit ist die Aufnahmetechnik der Trommelkamera der Belichtungstechnik von Harold Edgerton oder auch William Talbot (siehe oben im selben Kapitel) recht ähnlich. Die Trommelkamera liefert, bedingt durch die kurzen Belichtungszeiten bei lichtstarken Lichtimpulsen, sehr scharfe Bilder bei einer Bildrate von bis zu 20 000 fps.

Drehspiegelbelichtung:

Die Belichtung eines Films mittels eines sich drehenden Spiegels ist bislang die analoge Methode mit der höchsten Bildrate. Die Funktionsweise einer solchen Drehspiegelkamera wird mit dem folgenden Bild erklärt.

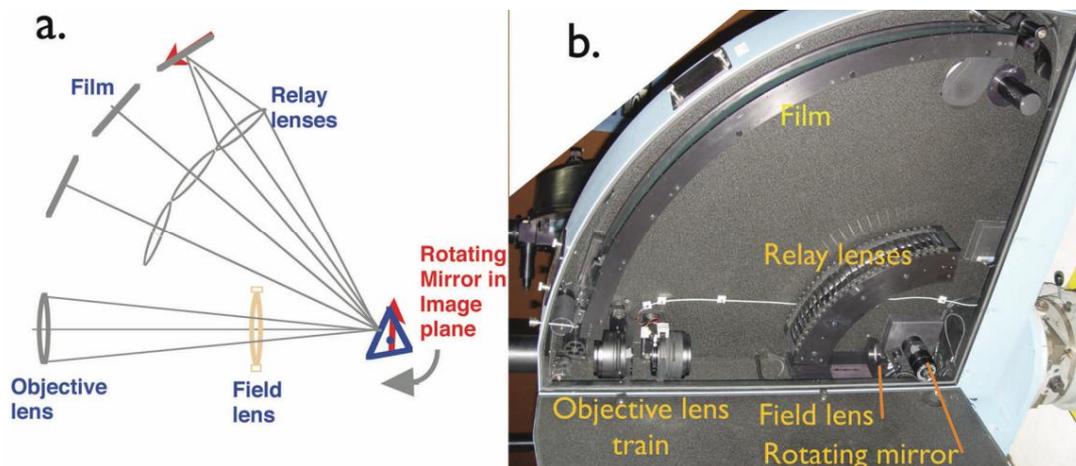


Abb. 7: Die Drehspiegelkamera schematisch (a) und real (b)

In Abb. 7 zeigt (a) das Schema einer Drehspiegelkamera: Durch das Objektiv (objective lens) fällt Licht ein und trifft auf einen sich drehenden Spiegel (rotating mirror), welcher das Licht mittels einer Reihe weiterer Linsen (im Bild als relay-lenses angeführt) auf einen dahinter aufgespannten Film wirft. Der Spiegel dreht hierbei mit sehr hoher Geschwindigkeit (20000 Umdrehungen / s), sodass man sämtliche bremsenden Elemente, so auch den Luftwiderstand, zu eliminieren sucht. Dies erreicht man im Kamerarinneren durch Evakuierung oder Befüllung mit einem leichten Gas (Helium).

Bei der Drehspiegelmethode ist der Film gegenüber anderen Methoden, wo er sich sehr schnell bewegen muss, keiner großen mechanischen Belastung ausgesetzt. Durch die begrenzte Länge des Films sind daher pro Filmsequenz nicht sehr viele Bilder möglich (120 beim „Industriestandard“ auf diesem Gebiet, der Cordin 119), diese können jedoch innerhalb sehr kurzer Zeitintervalle gemacht werden, sodass die Kamera Bildraten von bis zu 25000000 fps erreicht.

Bei moderneren Versionen der Drehspiegelkamera wird anstatt eines Films eine Reihe von CCD-Sensorchips (siehe hierzu den Abschnitt „Digitale Bildgebungsverfahren“) verbaut, sodass die Auswertung der Bilder digital erfolgen kann.

Digitale Bildgebungsverfahren:

Bevor wir uns dem digitalen High-Speed-Imaging zuwenden, müssen wir einige der wichtigsten Aspekte des digitalen Films und Fotografierens, zum Beispiel die verschiedenen Mechanismen der digitalen Aufnahme und Verarbeitung von Bildern, verstehen.

In den letzten Jahren und Jahrzehnten haben sich in hochtechnischen Anwendungen wie auch im Bereich der Amateurfotografie digitale Aufnahmeverfahren etabliert – diese ersetzen den Film als lichtempfindliches Element in der Kamera. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Sensorchips einerseits immer leistungsstärker (hohe Auflösung, schneller Speicherauslesevorgang), andererseits auch immer kostengünstiger wurden. Leistungsstarke digitale Sensor-, Rechen- und Speichereinheiten finden auf sehr engem Raum Platz, was hochauflösende Aufnahmen und auch deren problemloses Speichern ermöglicht. Vorteile der digitalen Aufnahmetechnik sind z.B. die Möglichkeit der raschen und einfachen Durchsicht, Analyse und Nachbearbeitung von Bildern und Videos; außerdem kann man nicht benötigtes oder nicht brauchbares Bildmaterial kostengünstig und umweltschonend digital entsorgen, ohne dass dabei echter Müll anfällt.

Im Zusammenhang mit der Auflösungsfähigkeit von Sensorchips hören wir häufig den Begriff „Pixel“ (abgekürzt px), bzw. „Megapixel“ (Mpx). „Pixel“ bezieht sich auf die Worte „Picture“ und „Element“, bezeichnet also ein „Bildelement“, oder einen „Bildpunkt“. Ein Bild wird zusammengefügt aus einer bestimmten Anzahl solcher Bildpunkte. In der Digitalfotografie und –filmtechnik bezeichnet der Begriff ein einzelnes lichtempfindliches Element im Sensorchip. Diese lichtempfindlichen Elemente wandeln die Information des auf sie treffenden Lichts in ein elektrisches Signal um, welches Informationen wie Farbe oder Intensität enthält. Aus den von den Pixeln generierten Informationen lässt sich dann ein Bild zusammensetzen. Grundsätzlich umfasst der Begriff „Pixel“ also zwei Bedeutungen: einerseits die des lichtempfindlichen Sensorelements, andererseits jene des „Bildpunktes“ oder Bildbausteines.

Nun übernimmt der Sensorchip in Digitalkameras also die Aufgabe des Films insofern, als er aus diesen lichtempfindlichen Sensorelementen besteht, welche, wie der Film, belichtet werden. Das aus dem Licht resultierende Signal bei verschiedenen Chips auf verschiedene Arten verarbeitet, zusammengesetzt und letztlich auf eine Massenspeichereinheit verschoben. Es existieren verschiedene Ansätze zur Bildgebung durch Sensorchips:

- CCD-(Charge Coupled Device)-Sensorchips.
- CMOS-(Complementary Metal Oxide Semiconductor)-Sensorchips

Die Funktionsprinzipien, Vorzüge und Nachteile der beiden Chipvarianten werden im Folgenden erläutert.

CCD-Sensorchips:

CCD-Chips besitzen eine Anordnung lichtempfindlicher Halbleiterelemente. Diese Halbleiterelemente haben die Eigenschaft, Ladungsträger freizusetzen, sobald sie elektromagnetischer Strahlung bzw. Licht ausgesetzt werden. Dies ist auf den photoelektrischen Effekt, genauer gesagt auf den photovoltaischen Effekt zurückzuführen: Bei Bestrahlung (entspricht einer Energiezufuhr) werden äußere Elektronen angeregt und so vom „Valenzband“ (den äußersten besetzten Zuständen im Atomverband) ins „Leitungsband“ (auf ein „freies“, ungebundenes Niveau) gehoben; diese Erzeugung freier Ladungsträger macht sich bei solchen Halbleiterelementen als messbare Spannung bemerkbar; die freien Elektronen werden in einem „Potentialtopf“ gespeichert.

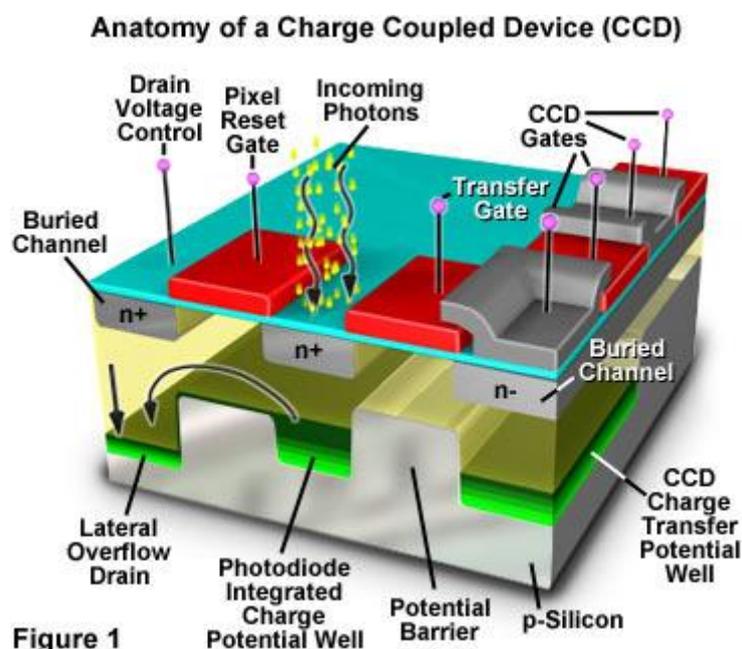


Abb. 8: Aufbau eines CCD-Sensorelements

In Abb. 8 sehen wir verschiedene „Potentialtöpfe“ und Potentialbarrieren. Die durch den Lichteinfall freigesetzten Elektronen sammeln sich zunächst im mittleren Topf; der linke Topf („Lateral Overflow Drain“) dient der Pufferung bei zu hohem Elektronenaufkommen, der

rechte („CCD Charge Transfer Potential Well“) dient dem Transport durch die Elektronenfreisetzung erzeugten Spannungssignals. Diese beiden Kanäle sind „Buried Channels“, also nicht dem Licht, welches auf das Sensorelement trifft, ausgesetzt, um Verfälschung der gesammelten Information zu vermeiden.

Je größer die Intensität des einfallenden Lichts, desto mehr Elektronen werden angeregt. Die erzeugte Spannung ist also proportional zur Lichtintensität. Wie erwähnt, besitzt jedes Fotoelement einen solchen „Potentialtopf“ zur kurzzeitigen Speicherung der freigewordenen Ladungsträger. Bei verschiedenen Fotoelementen sind natürlich verschiedene Werte zu erwarten, die alle ausgelesen und verwertet werden müssen. Wie funktioniert das? CCD-Chips werden „Zeile für Zeile“ ausgelesen. Es sind alle Fotoelemente miteinander verbunden, nun wird das jeweils erste Fotoelement einer Zeile am Rand des Chips, an dem sich ein „Ausgangsgate“ befindet ausgelesen, also auf seine Spannung überprüft. Dieses Signal wird durch einen Ausgangsverstärker zur weiteren Bearbeitung verstärkt. So werden also die äußersten Randpixel einer jeden Zeile ausgewertet. Ist dieser Vorgang beendet, werden die Signalspannungen um einen Platz in Richtung Ausgangsgate verschoben – das Signal des zweiten Sensorelements kommt also auf den nunmehr leeren Platz des ersten Sensorelements usw. Diesen Vorgang nennt man „Shifting“, er wird so oft wiederholt wie nötig. Nun bleiben die einzelnen Fotoelemente des Sensorchips aber auch während des (verhältnismäßig langsamen) Auslesevorgangs lichtempfindlich, man muss daher vermeiden, dass sich aufgenommene Informationen mit Informationen, die aufgrund dieser Lichtempfindlichkeit während der Auslese erzeugt werden, vermischen. Dies erreicht man, indem man Sensorbereiche schafft, welche „abgedunkelt“ sind, also während der Aufnahme keine wichtigen Informationen erzeugen (wie im Bild oben die „Buried Channels“). Nun kann sofort nach der Aufnahme die Information in diese abgedunkelten Bereiche verschoben werden, wo dann keine Gefahr eines unbeabsichtigten Informationsgewinns durch Lichteinfall besteht, was die mögliche Aufnahmebildrate stark erhöht. Hierzu haben sich zwei verschiedene Prinzipien etabliert: Der Interline-Transfer-Sensor (jede Zeile besitzt eine eigene „Dunkelzeile“) und der Frame-Transfer-Sensor (das Bild wird als Ganzes in einen großen „Dunkelbereich“ abseits der Aufnahmefläche transferiert) [4].

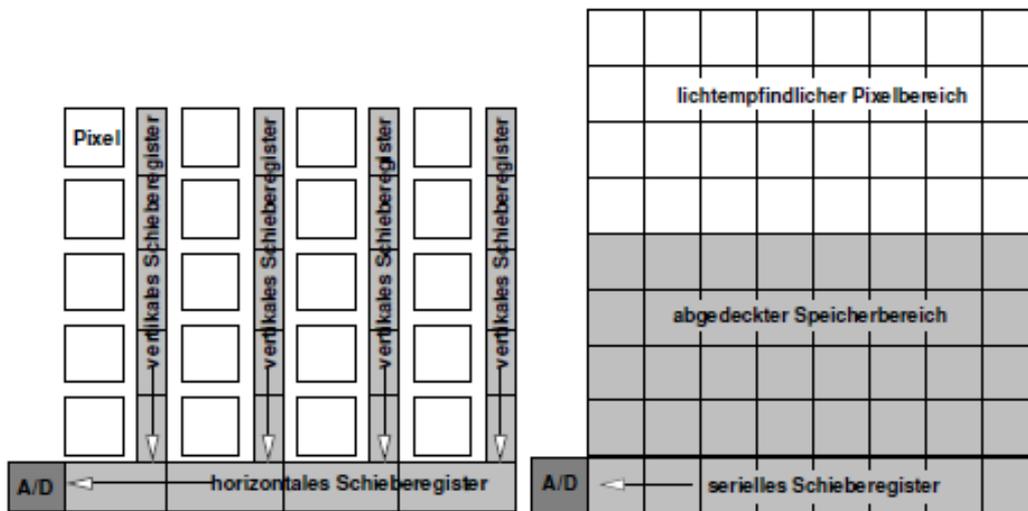


Abb. 9: Die Prinzipien der Auslese mittels Interline-Transfer-Technik (links) oder Frame-Transfer-Technik (rechts).
 „A/D“ steht für die Analog-Digital-Wandlereinheit.

Wichtig ist nun noch das Prinzip der Farbgebung. Hierzu ist jedes Sensorelement mit einer Filterschicht für eine der drei Grundfarben (Rot-Grün-Blau) überzogen; zumeist herrscht folgende Aufteilung:

- 25 % Rot
- 50 % Grün
- 25 % Blau

Diese Aufteilung wird als „Bayer-Pattern“ (nach der Entwicklung durch den Kodak-Mitarbeiter Bruce Bayer) bezeichnet und berücksichtigt die größere Grünempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Um eine wirklichkeitstreue Farbwiedergabe zu erreichen, werden bei der elektronischen Farbberechnung eines Pixels auch die Signalwerte der jeweiligen Nachbarpixel berücksichtigt [5].

Grundsätzlich zeichnen sich CCD-Sensoren durch einen geringen „Rauschanteil“ (weniger unerwünschte Einstreuungen) und die Möglichkeit recht hoher Auflösung aus; allerdings dauert der Ausleseprozess bedeutend länger als bei CMOS-Sensorchips, deren Funktionsweise im Folgenden erläutert wird. Auch können (vor allem bei älteren CCDs) Bildstörungen wie das „Blooming“ (siehe Abb. 10) entstehen, wenn die Potentialtöpfe der einzelnen Elemente „übergehen“, wenn also durch starken Lichteinfall so viele Elektronen frei werden, dass sich die Reaktion eines Sensorelements auch auf die Nachbarelemente auswirkt und Elektronen in die „Nachbarstöpfe“ übertreten.



Abb. 10: Blooming-Effekt,
hervorgerufen durch Sonnenlicht

CCD-Chips sprechen auf Wellenlängenbereiche elektromagnetischer Strahlung, welche das menschliche Auge nicht detektieren kann, an. Deshalb ist eine Nutzung von CCD-Sensorchips auch bei Infrarotkameras möglich.

CMOS-Sensorchips:

CMOS-Sensorchips besitzen, wie auch die CCD-Chips, systematisch angeordnete lichtempfindliche Fotoelemente (Fotodioden), welche durch Lichteinfall Ladungsträger freisetzen. Der wesentlichste Unterschied zu den CCD-Chips besteht in der Ansteuerung dieser Fotoelemente. Während CCD-Chips die Informationen ganzer Pixelreihen auslesen und die gesammelte Information von einem externen Verstärker auf eine der weiteren Verarbeitung angepasste Spannung verstärken, besitzt beim CMOS-Chip jedes Fotoelement seine eigene Verstärkerelektronik, nämlich einen Kondensator zum Speichern der freigewordenen Ladung in Form einer Spannung und einen Transistor als Verstärker des Signals. Die schon bei den Fotoelementen verstärkten Signale werden dann zeilenweise ausgelesen und der weiteren Verarbeitung zugeführt. Fotoelemente dieser Art werden auch Active Pixel Sensors (ASP) genannt.

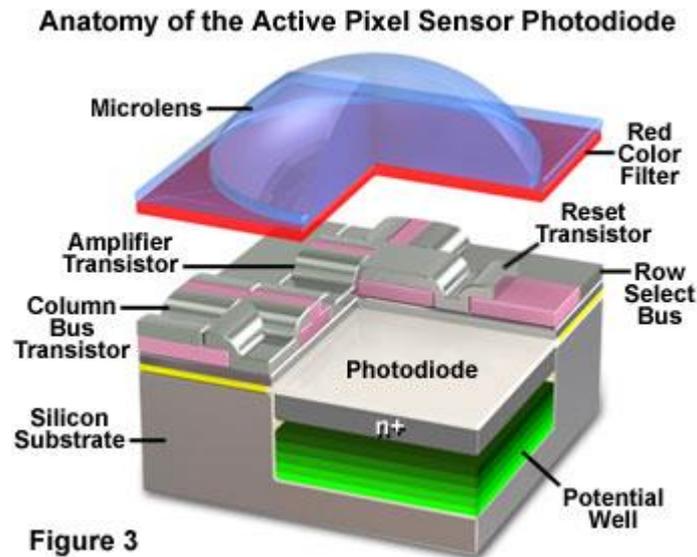


Abb. 11: Aufbau eines bei CMOS-Chips verwendeten Sensorelements.

In Abb. 11 ist der Aufbau eines CMOS-Sensorelements zu sehen. Auffällig ist die mittlerweile gängige Verwendung einer Mikrolinse (Microlens) zur besseren Lichtfokussierung. Unter dieser Linse ist die Farbfilterfolie (in diesem Fall rot) angebracht; auch können wir feststellen, dass nur ein Teil der Elementoberfläche tatsächlich lichtempfindlich ist; der Rest der Oberfläche wird von anderen Elektronikteilen vereinnahmt.

Baulich ist es bei CMOS-Chips möglich, einige elektronische Steuerelemente im Chip zu integrieren, wie z.B. Belichtungsmessung oder A/D-Wandler.

Besonders wichtig ist, dass beim CMOS-Sensorchip jedes Fotoelement einzeln angesteuert werden kann (anders als beim CCD-Sensor, wo ja, wie erwähnt, immer ganze Zeilen ausgelesen werden). Dies bringt einige Vorteile mit sich:

- Die Möglichkeit des Pixel-Binnings - das Zusammenfügen von Pixeln zu einem größeren Pixel (Super-Pixel). Man erreicht dadurch höhere Lichtempfindlichkeit und verringert das Bildrauschen.
- Die gezielte Ansteuerung eines Bildausschnitts, genannt ROI (Region of Interest), wird durch die separate Ansteuerung der einzelnen Pixel möglich. So werden gewünschte Bildausschnitte gezielt anvisiert und die Datenmenge verkleinert.
- Der schnelle Auslesevorgang, welcher gerade im Hinblick auf High-Speed-Kameratechnik von Vorteil ist.

Durch die Anordnung von Sensorelementen und ihrer jeweiligen Elektronik geht, wie in der Abb. 11 zu sehen, einiges an Platz auf der Sensoroberfläche verloren – dadurch können weniger lichtempfindliche Elemente pro Fläche verbaut werden, was zu verringerter Lichtempfindlichkeit und evtl. schlechterer Auflösung führt (aufgrund der geringeren möglichen Pixelanzahl pro Fläche). Dies sind die wesentlichsten Nachteile der noch recht jungen CMOS-Technologie.

Wie auch CCD-Chips sind CMOS-Sensorchips nicht in der Lage, Farben zu unterscheiden, deshalb kommen auch hier Farbfilterfolien zum Einsatz; die tatsächliche Farbe wird aus den Helligkeitswerten der einzelnen Filterfolien berechnet.

Grundsätzlich werden in den meisten High-Speed-Kameras (wie auch in der in dieser Arbeit verwendeten Casio Exilim) CMOS-Chips verbaut; in sehr speziellen Anordnungen mit hohen Frameraten jedoch, wie wir gesehen haben, immer wieder auch CCD-Chips. Dies ist darauf zurückzuführen, dass z.B. bei einer Drehspeigelkamera jeder Chip nur EIN Bild aufnehmen muss, weshalb eine sehr rasche Auslese nicht notwendig ist.

Digitales High-Speed-Imaging:

Wie schon erwähnt, werden vormals analoge High-Speed-Kamera-Systeme heute häufig mit verschiedenen Chipvarianten anstatt mit Film versehen, um eine digitale Verarbeitung zu ermöglichen. Zu den solcherart digital gewordenen High-Speed-Techniken kommen neue Systeme, welche das Aufzeichnen von High-Speed-Filmen erleichtern bzw. ermöglichen:

Bildwandlerkamas:

Licht, welches auf eine Fotokathode fällt, erzeugt dort freie Ladungsträger (Fotoelektrischer Effekt). Diese Elektronen werden mittels einer Spannung in Richtung einer Anode beschleunigt. Hierbei treten sie durch einen Mechanismus zur Vervielfachung der Elektronen (Bildverstärker – siehe unten). Die solcherart vervielfachten Elektronen treffen auf einen Phosphorschirm, an welchem Bilder entstehen, welche mit CCD-Sensoren aufgenommen werden.

Bildverstärker:

Bildverstärker werden bei sehr kurzen Verschlusszeiten benötigt, um die durch das wenige einfallende Licht erzeugten wenigen freien Elektronen, welche auf der Phosphorscheibe auftreffen sollen, zu vervielfachen. Nur so kann man sicherstellen, dass auch mit sehr wenig Licht (und bei sehr kurzen Verschlusszeiten gelangt nun einmal wenig Licht auf die Kathode) ein brauchbares Bild erzeugt werden kann.

Solche Bildverstärker sind zumeist als Mikrokanalplatten mit 10^6 bis 10^7 Kanälen ausgeführt. Diese Mikrokanalplatten arbeiten als Sekundärelektronenmultiplifier: Elektronen, welche auf die Plattenoberfläche treffen, schlagen weitere Elektronen (Sekundärelektronen) aus dem Atomverband der Platte, sodass eine starke Verstärkung des Elektronenstroms erzielt werden kann.

Bildverstärker kommen besonders dann zum Einsatz, wenn extrem kurze Verschlusszeiten (im ns-Bereich oder darunter) vonnöten sind.

Der Anschluss von Bildwandlerkameras mit Bildverstärker an CCD-Chips geschieht entweder mittels Glasfaserverbindungen direkt zu den Sensorelementen des Chips oder mit einer Optik, welche das am Phosphorschirm entstehende Bild direkt auf die Chipoberfläche projiziert.

Hochentwickelte CMOS-Chips:

Bestimmte CMOS-Chips sind in der Lage, mittels elektronischer Verschlussmechanismen eine Bildrate von 10 000 – 100 000 (Phantom-Reihe der Firma Vision-Research) oder sogar 10 000 000 fps (z.B. die HyperVision von Shimadzu) zu erreichen.

Weitere wichtige Aspekte des High-Speed-Imagings:

Triggerung:

Das „Triggern“ bezeichnet in der Technik häufig die Bestimmung eines Zeitpunktes, an dem etwas geschehen soll (z.B. der Beginn einer Messsequenz). In der High-Speed-Kameratechnik bezeichnet das Triggern die Einstellung jenes Zeitpunktes, an dem eine Aufnahmesequenz starten bzw. ein Bild gemacht werden soll. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit der gefilmten Vorgänge und der mitunter sehr kurzen Aufnahmedauer ist die Triggerung ein entscheidender

Faktor in der High-Speed-Kameratechnik, da das manuelle Starten von Aufnahmesequenzen schneller Vorgänge häufig nicht möglich ist.

Verschiedene elektronische Möglichkeiten der Triggerung sind z.B. optische Sensoren, welche Veränderungen oder Bewegungen in einem gewählten Bildausschnitt detektieren und die Aufnahme auslösen; auch die Auslösung über ein akustisches Signal ist möglich.

Auch können, wenn die Zeitintervalle zwischen zu filmenden Ereignissen immer gleich sind (z.B. auf einem Förderband vorbeifahrende Gegenstände), automatische Trigger auf diese Zeitintervalle eingestellt werden.

Die Verarbeitung und das Speichern von High-Speed-Material:

Meistens zeigen High-Speed-Kameras mit variabler Framerate das gleiche Verhalten: erhöht man die Framerate, sinkt die Auflösung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass elektronische Bauelemente pro Sekunde nur eine bestimmte Datenmenge bearbeiten können. Bei Verdoppelung der Framerate muss daher, sofern der Chip ausgelastet ist, die Auflösung zumindest halbiert werden, um eine problemlose Weiterverarbeitung zu ermöglichen.

Für unkomprimiertes Videomaterial ergeben sich so die folgenden Zusammenhänge:

$$\text{MEM (byte)} = N_{\text{pix}} (\text{pixel}) \times \text{col (byte/pixel)} \times \text{FR (s}^{-1}\text{)} \times t_{\text{Rec}} (\text{s})$$

MEM bezeichnet die aufgenommene Datenmenge in byte, N_{pix} bezeichnet die Pixelzahl. Col bezeichnet die Bitrate (Farbtiefe) pro Pixel, FR die Framerate (fps) und t die Aufnahmezeit.

Für High-End-Kameras, welche in Laboren und der Industrie Anwendung finden und aufgenommene Daten faktisch unkomprimiert speichern, trifft diese Formel in dieser Weise zu, Amateur-High-Speed-Kameras komprimieren das aufgenommene Material intern, sodass hier kleinere Datenmengen anfallen [6].

3. Experimente unter der Zeitlupe

3.1 Wellen und Schwingungen

Das Huygens'sche Prinzip - Wassertropfen:

In diesem Versuch wird das Huygens'sche Prinzip, eines der Grundprinzipien der Wellenlehre, am Beispiel eines Wassertropfens der ins Wasser fällt, demonstriert. Nebenbei sehen wir in Zeitlupe, was passiert, wenn ein Wassertropfen ins Wasser fällt.

Aufbau:

Eine Mischwanne wird so weit wie möglich mit klarem Wasser gefüllt, mit einer geeigneten Vorrichtung (tropfende Wasserleitung) werden normale Tropfen erzeugt, die auf die Wasseroberfläche treffen.

Durchführung:

Tropfen fallen auf eine möglichst ruhige Wasseroberfläche; die Kamera ist auf eine Bildrate von 600 fps eingestellt.

Beobachtung:



Abb. 12: Wassertropfen trifft auf Oberfläche auf.

Zunächst sehen wir wieder, dass Wassertropfen eher rund als oben spitz sind; wie eine Murmel sieht der Tropfen aus, bevor er ins Wasser fällt. Beim Aufprall auf der Oberfläche bildet sich ein Lufttrichter in der Wasseroberfläche, der Tropfen reißt quasi beim Eindringen ins Wasser ein wenig Luft mit. Am Rand des Trichters bildet sich ein kronenförmiger Wulst, der einige „Zacken“ aufweist – von diesen Zacken lösen sich Tröpfchen ab, die dann in jede Richtung radial vom Einschlagpunkt wegspritzen. Aus dem „Einschlagskrater“ steigt, sobald sich die

Wasseroberfläche zu glätten beginnt und der Trichter an Tiefe verliert, eine Wassersäule hoch. An der Spitze der Wassersäule löst sich ein Tropfen von ansehnlicher Größe (und natürlich rund), der dann separat wieder ins Wasser fällt.

Während alldem breiten sich rund um den Einschlagpunkt Wasserwellen aus, und zwar kreisrund, mit dem Einschlagpunkt als Mittelpunkt. Deren Ursache bzw. Entstehung wird im Abschnitt „Die Physik“ beschrieben.

Die Physik:

Der Einschlag des Wassertropfens ist ein Ereignis, bei dem vieles, das man nur mit einer High-Speed-Kamera beobachten kann, geschieht, nämlich der Einschlag selbst, die Bildung von Wasserwellen usw.

Zunächst befassen wir uns mit dem Auftreffen des Wassertropfens:

Der Wassertropfen trifft auf die Oberfläche auf und wird dadurch abgebremst. Durch seine Trägheit (Erklärung des Begriffs in der Beschreibung des Versuchs „Wasserballon“) wird er jedoch nicht abrupt abgebremst, sondern sinkt noch ein wenig in das Wasser ein. Dies kann man überprüfen, indem man einen gefärbten (Tinten-)Tropfen in klares Wasser fallen lässt – dieser wird ein klein wenig einsinken. Durch das Einsinken ins Wasser bildet sich kurzzeitig eine Art „Krater; ein luftgefüllter Trichter in der Wasseroberfläche.

Dies ist eine Folge der Kohäsionskräfte zwischen den Wassermolekülen bzw. der Oberflächenspannung (Zur näheren Erklärung von Kohäsion und Oberflächenspannung siehe die Versuchsbeschreibung „Wassertropfen – Oberflächenspannung“). Auch wird durch den Einschlag des Tropfens eine Art Wasserwulst um den Lufttrichter gebildet – dieser besteht aus verdrängtem bzw. beim Einschlag hochgeworfenem Wasser und pflanzt sich radial auf der Wasseroberfläche fort – der Ursprung der ersten der nun entstehenden Wellen, zu denen wir noch kommen werden.

Der besprochene Trichter strebt aufgrund der Oberflächenspannung (Flüssigkeiten streben nach möglichst kleiner Oberfläche) danach, sich zurückzubilden, daher wird die Trichterwand in Richtung Oberfläche gezogen. Jener Teil der Trichterwand, der sich eher am Boden des Trichters befindet, wird dabei recht stark beschleunigt und schießt über das Oberflächenniveau hinaus. Dies ist die in „Beobachtung“ erwähnte, hochsteigende „Wassersäule“. Deren Spitze ist dicker als das Fundament; Diese größere Wassermenge „wehrt“ sich gegen das Runterfallen,

und zwar mehr als die masseärmeren Teile der Säule, weshalb sich die langsamer umkehrende Säulenspitze von den schneller umkehrenden unteren Säulenbereichen trennt und als großer, runder Tropfen nach unten fällt.

Alle diese Ereignisse – der erste entstehende Wulst, die sich ausgleichende Wasseroberfläche, die zurückfallende Wassersäule – bewirken „Störungen“ der Wasseroberfläche, welche wir als Wellen wahrnehmen können. Mit diesen Wellen, welche sich so aufgrund des Huygens´schen Prinzips ausbreiten, werden wir uns jetzt beschäftigen.

Das Huygens´sche Prinzip ist eines der fundamentalsten Prinzipien der Wellenlehre. Es besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront der Ausgangspunkt einer neuen Welle (Elementarwelle) ist. Die Summe aller dieser Elementarwellen überlagert sich dann zur beobachteten Wellenform. Im vorliegenden Fall sieht dies folgendermaßen aus:

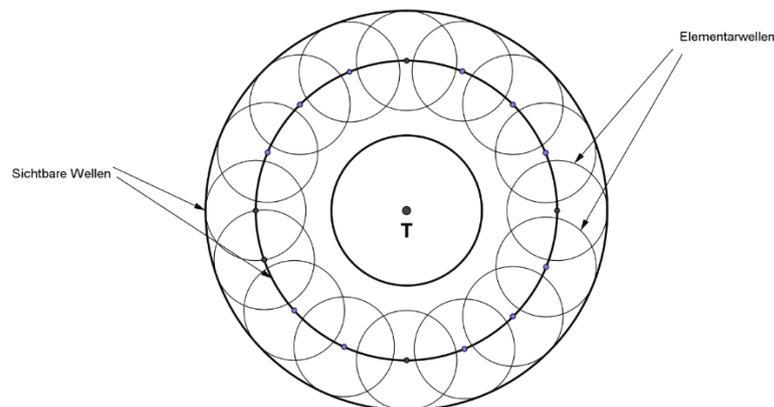


Abb. 13 : Schematische Darstellung des Huygens´schen Prinzips

Die schematische Darstellung zeigt Folgendes: Der Tropfen trifft im Punkt T auf. Ausgehend von hier breiten sich Wellen aus, und zwar gleichmäßig in jede mögliche Richtung, also kreisförmig auf der Wasseroberfläche! Gemäß des Huygens´schen Prinzips ist jeder Punkt auf der Wellenfront der Ausgangspunkt einer neuen, sich ebenso kreisförmig ausbreitenden Welle – diese vielen Elementarwellen überlagern sich zu der beobachteten Wellenform (dies wird zu besserer Anschaulichkeit bzw. damit kein zu großer Kreis-Salat entsteht, hier nur auf der äußersten Wellenfront und nur mit einigen Punkten illustriert). Jene Wellen, welche wir tatsächlich sehen können, werden in der Grafik mit dicken Linien dargestellt.

Das Huygens´sche Prinzip kann zur Erklärung vieler Phänomene der Wellenlehre – z.B. Reflexion, Brechung, Beugung – herangezogen werden und ist für verschiedene Wellenarten, mechanische Wellen ebenso wie elektromagnetische Wellen bzw. Licht, anwendbar.

Stehende Welle – Wellenmaschine:

Aufbau:

Zur Demonstration stehender Wellen gibt es am Institut für Experimentalphysik der TU Graz eine Wellenmaschine, welche aus einer durch einen Elektromotor betriebenen, sich drehenden Scheibe, einem an deren Rand befestigten Spagat und einer Auflage in $L = 50\text{ cm}$ Entfernung besteht. Diese Anordnung braucht zur Demonstration der Entstehung von Schwingungsknoten nicht weiter modifiziert werden. Die Knotenzahl kann man durch Änderung der Spannung vergrößern bzw. verkleinern. Die High-Speed-Kamera wurde auf eine Bildrate von 600 fps eingestellt.

Durchführung:

Nach dem Einschalten der Maschine dreht sich die Scheibe an der linken Seite der Maschine mit einer Kreisfrequenz ω (entspricht dem überstrichenen Winkel / s) und regt so die Schnur mit einer Kreisfrequenz $\omega = 2\pi\nu$ an, wobei ν für die Frequenz mit der Einheit Hertz [Hz] steht. Man führt nun den Spagat zum gegenüberliegenden Auflagerad, in dessen Vertiefung er während des Versuchs festgehalten werden kann. Das Ende des Spagats behält man in der (rechten) Hand. Durch Veränderung der Spannung kann man nun unterschiedliche Formen stehender Wellen darstellen.

Beobachtung:

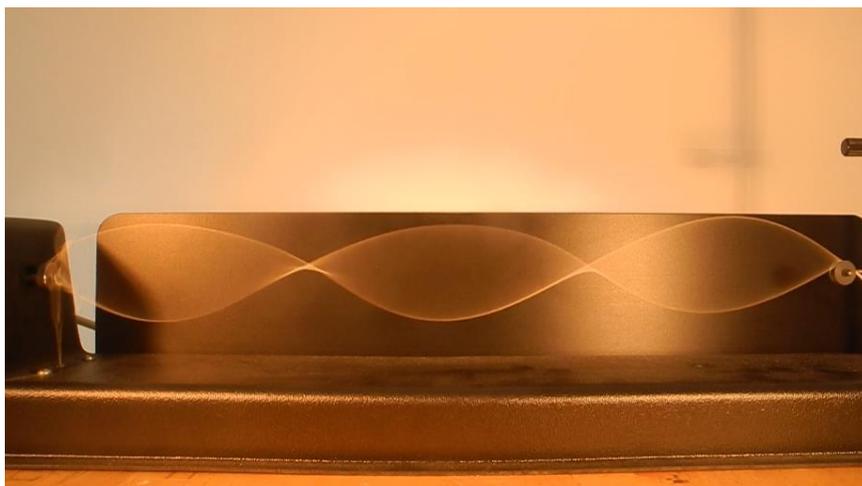


Abb. 14: Ausschnitt aus Echtzeitvideo „Seilwellenmaschine“

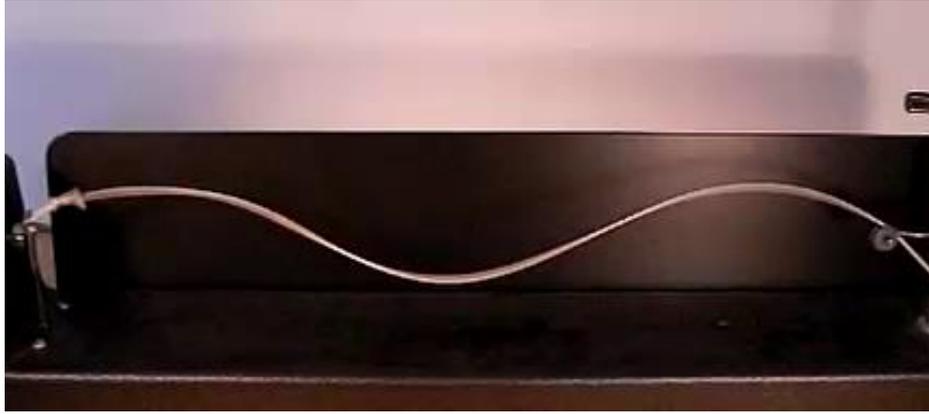


Abb. 15: Ausschnitt aus High-Speed-Video „Seilwellenmaschine“

Zunächst muss man die Schnur stark spannen, um eine stehende Welle ohne Knotenpunkte (Strecke $L = \lambda/2$) zu erhalten. Reduziert man die Spannung und "gibt etwas Schnur", so erhält man stehende Wellen mit $L = \lambda$, $L = 3\lambda/2$ und $L = 2\lambda$. Spannt man die Schnur nun wieder stärker, so zeigen sich wieder weniger Knoten. Bei 600 fps zeigen sich zwischen den Zeitspannen, in denen stehende Wellen zu beobachten sind, jeweils kurze Phasen der turbulenten Schnurbewegung, die „unregelmäßig“ erscheint, bis die Spannung wieder so weit ab- bzw. zugenommen hat, dass wieder eine stehende Welle sichtbar wird.

Die Physik:

Wie weiter oben erwähnt, sind beide Schnurenden fixiert (das eine Ende am „Motor“, das andere auf der Auflage). Fixierte Enden stellen immer Knotenpunkte dar; da der Knotenabstand $\lambda/2$ beträgt, können stehende Wellen nur dann entstehen, wenn die Forderung

$$L = n \cdot \lambda/2 \quad (3.1)$$

erfüllt wird, das heißt nur wenn die Länge zwischen den zwei Auflagepunkten ein ganzzahliges Vielfaches von $\lambda/2$ darstellt.

Es mag verwundern, dass mehr Knotenpunkte entstehen (entspricht einer Verkleinerung der Wellenlänge) wenn man die Saitenspannung verringert. Schließlich weiß jeder Streicher, Gitarrist und Pianist, dass man, um höherzustimmen (höhere Frequenz = kleinere Wellenlänge), die Saitenspannung erhöhen muss. Warum also erhalten wir hier mehr Knoten, wenn man die Saitenspannung verringert?

Dazu betrachten wir zunächst eine der grundlegendsten, mechanische Wellen betreffende Formeln:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \text{bzw.} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3.2)$$

mit c als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle, λ als Wellenlänge und ν als Frequenz.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c wird beeinflusst von der Saitenspannung \vec{F}_S , von der Querschnittsfläche der Saite q und der Dichte des Saitenmaterials ρ , und zwar in der folgenden Weise:

$$c = \sqrt{\frac{\vec{F}_S}{\rho \cdot q}} \quad (3.3)$$

Auch kennen wir bereits den folgenden Zusammenhang:

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (3.4)$$

welchen wir zu

$$\lambda = \frac{2L}{n} \quad (3.5)$$

umformen. In der Formel

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3.6)$$

ersetzen wir nun c und λ durch die obenstehenden Ausdrücke und erhalten

$$\nu = \frac{n}{2L} \cdot \sqrt{\frac{\vec{F}_S}{\rho \cdot q}} \quad (3.7)$$

Die Frequenz ν ist ja von der Maschine vorgegeben und ändert sich daher nicht. Damit ν konstant bleibt, muss sich bei sich verringernder Spannkraft F_S die Knotenzahl n erhöhen, da weder die Schnurlänge L , noch die Dichte ρ noch der Schnurquerschnitt sich ändern können. Wir wissen auch, dass eine stehende Welle nur dann entstehen kann, wenn n ganzzahlige Werte > 1 annimmt. Nimmt n einen nicht ganzzahligen Wert an, so äußert sich dies in den oben erwähnten Unregelmäßigkeiten.

Umgeformt nach der Wellenlänge ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$\lambda = \frac{1}{\nu} \cdot \sqrt{\frac{\vec{F}_S}{\rho \cdot q}} \quad (3.8)$$

Die Wellenlänge λ ist also proportional zur Spannkraft \vec{F}_S .

$$\lambda \sim \sqrt{\frac{\vec{F}_S}{const.}} \quad (3.9)$$

Dieser Umstand bestätigt sich auch bei der Durchsicht der von der Firma Leybold herausgegebenen Beschreibung und Gebrauchsanleitung der Seilwellenmaschine.

Stehende Welle - Kundt'sche Röhre:

Aufbau:

Die Kundt'sche Röhre ist ein klassischer Versuch zur Demonstration stehender Wellen. Benötigt wird ein waagrecht gelagertes, durchsichtiges Rohr aus Glas / Plexiglas, welches an einem Ende mit einem verschiebbaren Stempel verschlossen wird. In das Rohr wird eine kleine Menge feinen Korkstaubs eingebracht und gleichmäßig verteilt. Das zweite Röhrenende bleibt offen, hier passiert dann die Anregung stehender Wellen durch eine Schallquelle (Lautsprecher, Trillerpfeife...).

Durchführung:

Um die Ausbildung einer stehenden Welle feststellen zu können, muss man zunächst die Stellung des verschiebbaren Stempels so anpassen, dass die Rohrlänge L ein ganzzahliges Vielfaches von $\lambda/2$ (mit λ als Wellenlänge des Pfeifentons) darstellt (siehe hierzu auch den Versuch „Stehende Welle / Wellenmaschine“). Dies erreicht man, indem man ein paar Mal am Rohrende in die Pfeife bläst und den Stempel nach und nach so verschiebt, dass im Rohr möglichst deutliche Korkstaubhäufchen entstehen.

Pro Versuchssequenz blies ich dann drei Mal mit einer Trillerpfeife in die Röhre. Es ist ratsam, bei der Durchführung dieses Versuchs Ohrenstöpsel oder einen anderen Gehörschutz zu verwenden.

Beobachtung:

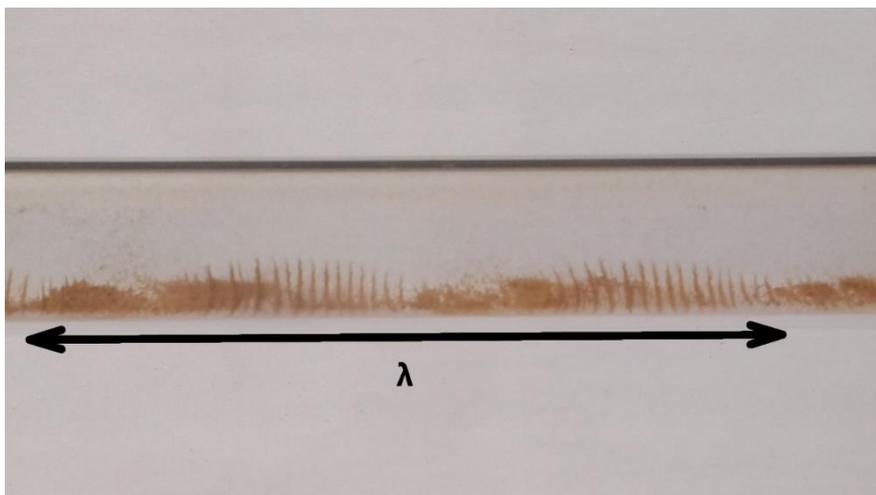


Abb. 16: Ausschnitt aus Echtzeitvideo „Kundt'sche Röhre“.

Wie im Bild zu erkennen, wiederholen sich die Häufungen des Korkmehls periodisch (siehe den die Wellenlänge kennzeichnenden Pfeil). Ebenso unterliegen die kleineren Häufungen, welche ca. 0,5 cm auseinander liegen, einer periodischen Ordnung.



Abb. 17: Ausschnitt aus High-Speed-Video „Kundt'sche Röhre“

Sobald man in das Rohr pfeift, erkennt man im Film, dass sich der Korkstaub an bestimmten Punkten im Rohr zu sammeln beginnt. Hierbei sind einerseits gröbere Anhäufungen in größeren Abständen zu erkennen (aus welchen wir die Wellenlänge des Pfeiftons ermitteln können), andererseits auch feinere Anhäufungen in kürzeren Abständen, welche im High-Speed-Video besonders gut zu sehen sind. Die Staubteilchen „tanzen“ hierbei an bestimmten Punkten in der Luft.

Sobald der Ton stoppt, fallen die Korkteilchen auf den Boden der Röhre und bilden dort das Muster, welches im Video und den Bildern oben erkennbar ist.

Die Physik:

Die Kundt'sche Röhre ist, wie oben erwähnt, ein klassischer Versuch zur Demonstration von stehenden Wellen. Das schwingende Medium ist hierbei die Luftsäule im Rohr. Zum Schwingen bringt man diese, indem man das offene Ende der Röhre mit einem Lautsprecher bespielt (Sinus-Ton) oder mit einer Trillerpfeife hineinbläst. Die Schallwelle, die sich im Rohr ausbreitet, wird am verschiebbaren Stempel am anderen Rohrende reflektiert. Hat man die Stellung des Stempels an die Wellenlänge angepasst, so überlagern sich die einfallende und die reflektierte Welle zu einer stehenden Welle – die Wellenknoten der beiden Wellen liegen hierbei an den gleichen Positionen. Mathematisch lässt sich dies folgendermaßen ausdrücken:

Eine einfache harmonische Schwingung wird durch die Gleichung

$$y(x, t) = y_0 \cdot \sin(\omega t + kx) \quad (3.10)$$

beschrieben. Diese Gleichung sagt uns, welche Amplitude y die Welle zum Zeitpunkt t am Ort x hat. Hierzu muss man folgende Parameter kennen:

- den gewünschten Ort x
- die gewünschte Zeit t
- die Maximalauslenkung y_0
- die Kreisfrequenz ω ($= 2\pi\nu$) mit ν als Frequenz mit der Einheit Hertz [Hz]
- die Wellenzahl k ($= 2\pi/\lambda$)

Diese Welle läuft nun gegen den Stempel und wird dort reflektiert. Die reflektierte Welle wird durch die Gleichung

$$y_r(x, t) = y_0 \cdot \sin(\omega t - kx) \quad (3.11)$$

beschrieben. Wie man sieht, sind alle Parameter gleich geblieben! Da die Welle nun aber in die entgegengesetzte Richtung läuft, hat sich k durch $-k$ ersetzt.

Es überlagern sich nun die einfallenden und die reflektierten Wellen zu einer stehenden Welle. Mathematisch wird dies mit Hilfe eines Additionstheorems

$$\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (3.12)$$

ausgedrückt. Wir erhalten

$$y_s(x, t) = 2y_0[\cos(kx) \cdot \sin(\omega t)], \quad (3.13)$$

wobei $y_s(x, t)$ der Amplitude der stehenden Welle ist. Diese ist jetzt für einen gegebenen Ort zu jeder Zeit gleich. Im Abstand $\lambda/2$ zueinander befinden sich die Wellenknoten, welche grafisch als „Nulldurchgänge“ ersichtlich sind. An diesen Stellen bewegen sich die Luftteilchen nicht. An den Stellen maximaler Auslenkung (den „Wellenbäuchen“) bewegen sich die Luftteilchen sehr stark und blasen das Korkmehl von dort weg, und zwar dorthin, wo die Luft sich faktisch nicht bewegt – eben den Wellenknoten. Wie in Abb. 16 zu erkennen, kann man also aus den Abständen der Korkstaubanhäufungen die Wellenlänge des verwendeten Tons ermitteln – der Abstand zwischen zwei Haufen entspricht hierbei $\lambda/2$.

Auch kann man, bei bekannter Wellenlänge, die Geschwindigkeit des Schalls im in der Röhre befindlichen Gas bestimmen. Dies geschieht mittels der bekannten Beziehung:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (3.14)$$

mit c als der Schallgeschwindigkeit, λ als der Wellenlänge des verwendeten Tons und ν seiner Frequenz.

Bei der Betrachtung des Phänomens sollte man auch die verschiedenen Ausprägungen der Anhäufungen in Betracht ziehen; so sind einerseits die größeren Anhäufungen mit Wellenlängen von mehreren Zentimeter zu beobachten, andererseits auch die erwähnten „engeren“ Häufungen, welche von Oberschwingungen (als ganz- bzw. halbzahliges Vielfaches der Grundfrequenz) herrühren mögen.

Resonanzkreisel:

Aufbau:

Der Resonanzkreisel wird am Griff mit Stativmaterial so fixiert, dass er trotz der Kräfte, welche durch das Kreiseln bzw. das Antreiben des Kreisels auf ihn wirken, nicht aus seiner Position verrutschen kann. Der im Versuch verwendete Kreisel besteht aus einer Messinglegierung und Holz und ist auf das Jahr 1910 datiert. Bei einem solchen historischen Relikt ist natürlich Vorsicht geboten.

Eine an einem Holzgriff befestigte Schnur, welche benötigt wird, um den Kreisel in Gang zu setzen, liegt bereit.

Durchführung:

Die Schnur wird am Kreisel befestigt und aufgewickelt. Dann zieht man wohldosiert (kräftig, aber nicht so fest, dass die Schnur reißt) an der Schnur und bringt so den Kreisel in Gang.

Beobachtung:

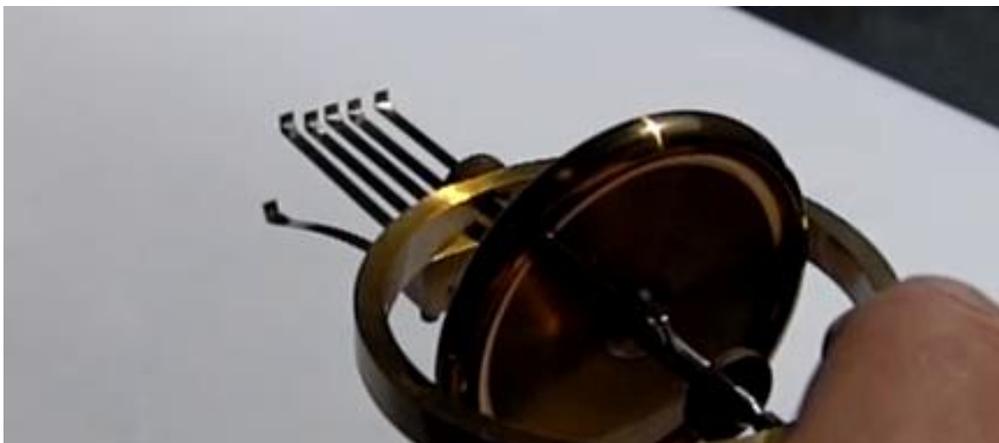


Abb. 18: Schwingende Metallzunge am Resonanzkreisel

Sobald sich der Kreisel dreht, können wir feststellen, dass eine der oben am Kreisel angebrachten Metallzungen zu schwingen beginnt. Bei 20-facher Zeitlupe (600fps) können wir das „Aufschaukeln“ der Schwingung sehr gut beobachten. Die Stärke der Auslenkung baut sich recht langsam auf, erreicht dann ein Maximum und verringert sich dann wieder. Dann beginnt die nächstlängere Metallzunge auf dieselbe Weise zu schwingen, dann wieder die nächste usw.

Zuletzt schwingt die längste Metallzunge. Hat auch diese aufgehört zu schwingen, so beginnt das Ganze nach einiger Zeit von neuem; Wieder schwingt die kürzeste der Metallzungen, allerdings nun mit bedeutend geringerer Amplitude.

Die Physik:

Der Resonanzkreisel bedient sich eines Phänomens, welches im täglichen Leben im Zusammenhang mit Schwingungen in vielfältiger Weise in Erscheinung tritt: der Resonanz (daher natürlich der Name). Was ist Resonanz eigentlich, und warum schwingen die Metallzungen, wenn sich der Kreisel dreht?

Jedes schwingfähige System besitzt eine oder mehrere Resonanzfrequenzen, welche gleichzeitig die Eigenfrequenzen darstellen. Wirkt auf ein solches System eine mechanische Welle mit der Resonanzfrequenz, so wird dieses zum Mitschwingen bewegt. „Wirkung einer Welle mit Resonanzfrequenz“ bedeutet, dass das schwingfähige System periodisch mit einer seiner Eigenfrequenzen angeregt werden muss.

Ein anschauliches Beispiel ist der vorliegende Resonanzkreisel. Ein Schwungrad, wird zum Drehen gebracht. Dieses Schwungrad ist nicht völlig rund, bzw. ist sein Gewicht nicht ganz gleichmäßig verteilt (z.B. durch eine angebrachte Schraube am Rand, welche bewirkt, dass der Schwerpunkt ein wenig aus dem Mittelpunkt rückt). Dies bewirkt beim Drehen des Schwungrades, dass der ganze Kreisel zu leichtem Schwingen während der Umdrehungen des Rades verleitet wird. Die Schwingungsdauer wird durch die Drehgeschwindigkeit des Schwungrades bestimmt. Zieht man kräftig an der Schnur, die das Schwungrad in Gang bringt, so ist die Schwingungsdauer zunächst zu kurz, um die Metallzungen zum Mitschwingen zu bringen. Mit der Zeit aber gibt das Schwungrad Energie ab (leichte Reibung bei den Auflagepunkten usw.) und wird langsamer, wodurch auch die Schwingungen des Kreisels langsamer werden. Die Frequenz der Kreiselschwingung (also die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde) kommt nun in den Bereich der Resonanzfrequenzen der Metallzungen, weshalb diese nacheinander zum Schwingen angeregt werden. Wie bei „Beobachtung“ erwähnt, passiert, nachdem die letzte, längste Metallzunge zu schwingen aufgehört hat, kurz nichts, dann beginnt das Ganze von Neuem (mit geringerer Amplitude). Dies passiert, da die Metallzungen nicht nur eine Resonanzfrequenz besitzen, sondern mehrere, die jedoch zueinander in klar definierten Verhältnissen stehen. Ist

$$f_R = \nu \quad (3.15)$$

eine Resonanzfrequenz eines Systems, so sind auch 2ν , 4ν und 8ν Resonanz- bzw. Eigenfrequenzen. In der Akustik werden ν als „Grundton“, die Vielfachen davon „Obertöne“ genannt. Im Falle des Resonanzkreisels beginnen Metallzungen also erneut zu schwingen, weil die „nächstuntere“ Resonanzfrequenz erreicht wurde. Am Beispiel des Resonanzkreisels wird auch verständlich, warum man Resonanz auch als „Schwingen mit maximaler Amplitude“ beschreiben kann. Ein von einer anregenden Frequenz angeregter schwingfähiger Körper schwingt genau dann am stärksten (eben mit maximaler Amplitude), wenn die anregende Frequenz einer seiner Eigenfrequenzen identisch ist.

Das Phänomen der Resonanz spielt besonders in der Akustik eine große Rolle – einerseits als erwünschter Effekt, zum Beispiel bei Musikinstrumenten, andererseits auch als unerwünschter (Neben-)Effekt, wenn Dinge bei ihrer Resonanzfrequenz angeregt werden, sich entsprechend bewegen und dabei auch Geräusche abgeben. Kann ein System aufgrund geringer Dämpfung sehr stark schwingen, so kann es im extremen Fall zu einer „Resonanzkatastrophe“ kommen – die schwingende Konstruktion wird dabei so lange angeregt, bis sich die Schwingung soweit aufgeschaukelt hat, dass die Konstruktion letztlich zerstört wird. Dies ist der Grund, warum Soldaten nicht im Gleichschritt über Brücken marschieren – der Gleichschritt stellt eine periodische Anregung dar, weil die Brücke in immer gleichen Zeitabständen von oben „getreten“ wird. Liegt diese „Tretfrequenz“ nahe einer Resonanzfrequenz, so kann die Brücke zu schwingen beginnen und im Extremfall auseinanderbrechen. Ein bekanntes Beispiel einer aufgrund von Resonanz einstürzenden Brücke ist die Zerstörung der „Tacoma-Narrows-Bridge“ im US-Bundesstaat Washington im Jahre 1940.

Auch bei Erdbeben können die seismischen Wellen (die „Erdstöße“) Häuser, welche durch diese Wellen zum Schwingen gebracht werden, einstürzen lassen.

Sitzt man auf einer Schaukel, so kann man, wenn man im richtigen Moment und in immer gleichen Zeitabständen einen Stoß in den Rücken erhält, recht hoch schaukeln.

Der Effekt der Resonanz bei Musikinstrumenten wird im nächsten Versuch untersucht.

Schwingende Klaviersaiten / Klaviersaiten in Resonanz:

Im folgenden Versuch wurden einige Versuche mit einem Klavier gemacht; so versuchte ich, die Saitenschwingungen gut sichtbar zu machen, außerdem möchte ich zeigen, wie Resonanz im Klavier funktioniert.

Aufbau:

Ein gut gestimmter Flügel wird geöffnet, die Kamera ist so positioniert, dass sie die tiefsten Saiten gut im Videofeld hat. Einige starke Scheinwerfer zur genügenden Ausleuchtung sind wichtig.

Durchführung:

Der Dämpfer des Flügels wird angehoben, dadurch können alle Saiten frei schwingen. Nun wird ein sehr tiefer Ton, z.B. die dritte weiße Taste ganz links, das C1, angeschlagen. Wegen des gehobenen Dämpfers schwingt die Saite nach dem Anschlag weiter. Die High-Speed-Kamera ist ins Innere des Flügels, auf die angeschlagene Saite sowie die nächsthöheren Saiten, gerichtet.

Beobachtung:



Abb. 19: Klaviersaiten (bearbeitetes Bild)

Im ersten Video sehen wir die schwingende Saite C1; die Auflösung von 1200 fps zeigt, wie die Welle am befestigten Saitenende reflektiert wird und sich damit auch die Auslenkungsrichtung verkehrt.

Im zweiten Video wird der Dämpfer gehoben und dieselbe Taste wie zuvor angeschlagen.

Wir sehen nun wieder diese Saite schwingen – dazu schwingen aber auch andere Saiten, obwohl diese nicht angeschlagen wurden! Es sind dies jene Saiten, welche 7 bzw. 12 Halbtöne höher als der angeschlagene Ton klingen.

Die Physik:

Im ersten Video sehen wir die Reflexion einer Welle am fixierten Ende – die Auslenkungsrichtung ändert sich, die Auslenkungen der rücklaufende Welle sind gegenüber der einlaufenden genau „entgegengesetzt“, dies entspricht einer Phasenverschiebung von 180° . Die Reflexion von Wellen am offenen (freischwingenden) bzw. am geschlossenen Ende werden im gleichnamigen Versuch näher erklärt.

Im zweiten Video sehen wir die Resonanz von Klaviersaiten. Es wurde das C1 angeschlagen, im Video sehen wir, dass nicht nur die C1-Saite schwingt, sondern auch jene Saiten, welche 7 bzw. 12 Halbtöne höher schwingen als das C1. Es sind dies das G1 und das C. In der Musiktheorie bezeichnet man das Intervall C-G als Quint, das Intervall C – C als Oktav. Diese Intervallbezeichnungen beziehen sich auf genau festgelegte Frequenzverhältnisse, so gilt für die Frequenzverhältnisse Grundton – Quint und Grundton-Oktav:

$$\frac{3}{2}v_G = v_Q \quad (3.17)$$

und

$$2 v_G = v_O \quad (3.18)$$

Die Frequenz der Quint ist also genau $3/2$ -mal so hoch wie die Grundfrequenz, die der Oktav doppelt so hoch wie die Grundfrequenz! Es ist kein Zufall, dass genau diese Saiten schwingen. Im vorigen Versuch haben wir mit Resonanz experimentiert. Wir haben gesehen, dass es mehrere Resonanzfrequenzen gibt, welche in definierten Zahlenverhältnissen zueinander stehen. Dies wird hier in die Praxis umgesetzt. Die tiefere Saite C1 schwingt und erzeugt so Schallwellen. Dass Schallwellen eigentlich sich fortplanzende lokale Druckunterschiede sind, haben wir im Versuch „Lautsprecher“ gesehen. Diese Zonen unterschiedlicher Drücke breiten sich in die Umgebung aus (unter anderem zu unserem Ohr). In ihrem Weg liegen viele Klaviersaiten, deren Eigenfrequenzen in keinen so einfachen Verhältnis stehen wie Quint und Oktav – diese werden nämlich von den „Luftstößen“ der Schallwelle periodisch, also in immer gleichen Zeitabständen, und noch dazu mit einer ihrer Eigenfrequenzen, angestoßen. Weil die Frequenz der Oktav genau doppelt so hoch ist wie die des Grundtons, kommt immer zum günstigsten Zeitpunkt eine „Luftwelle“ bei ihr an, was sie schließlich zum Schwingen verleitet. Durch die folgenden Bilder werden die Frequenzverhältnisse grafisch veranschaulicht:

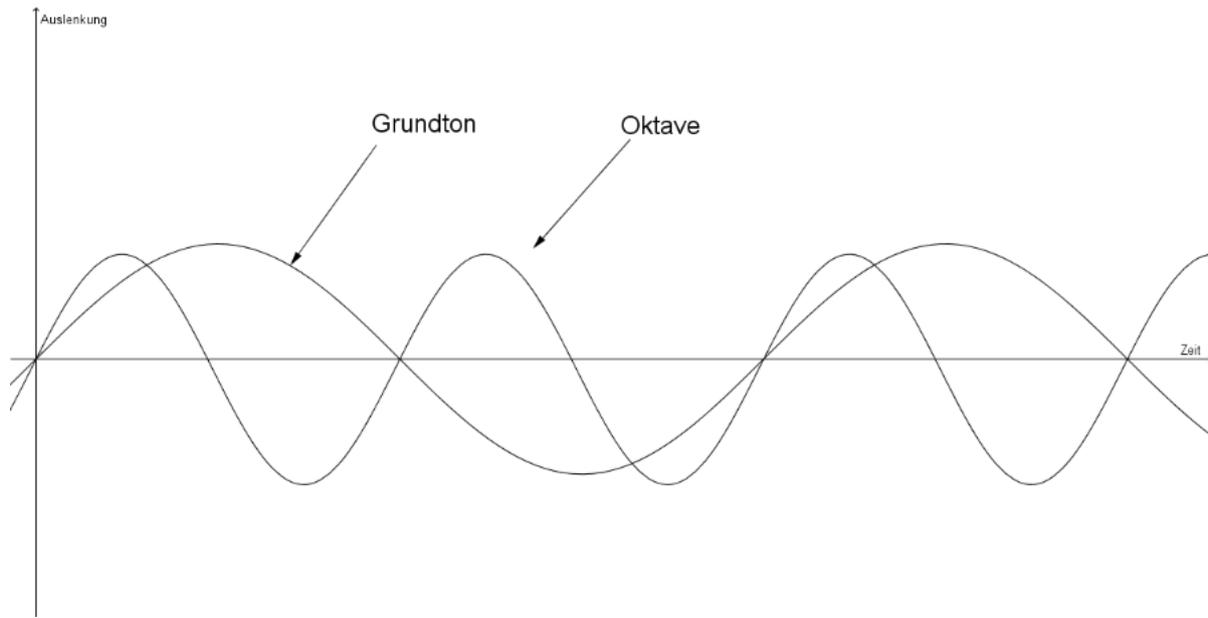


Abb. 20 : Frequenzverhältnis Grundschiwingung – Oktave

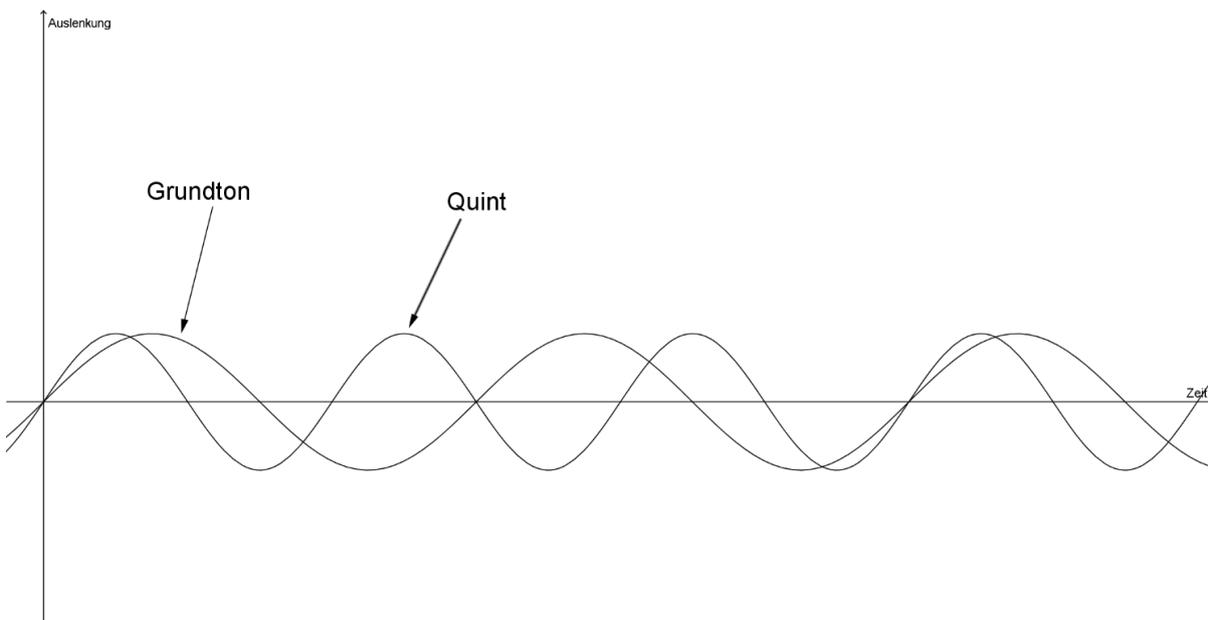


Abb. 21 : Frequenzverhältnis Grundschiwingung – Quint

Wir sehen in Abb. 20, dass die Oktav bei jeder zweiten Periode einen Nulldurchgang genau gleichzeitig mit dem Grundton besitzt, sie wird also alle zwei Wellenzüge einmal von der Schallwelle der C1-Saite „angestoßen“. Die Quint (Abb. 21) „trifft“ die Grundschiwingung nur bei jedem dritten Wellenzug, wird daher seltener angestoßen als die Oktav und schwingt daher auch nicht so stark mit, wie im Video gut zu sehen ist.

Die Resonanz wirkt sich stark auf den Klang von Musikinstrumenten aus; so klingt das Klavier zum Beispiel, wenn man eine Taste bei gehobenem Dämpfer (also fehlender Dämpfung aller Saiten) anschlägt, viel strahlender und durchdringender als wenn der Dämpfer wirksam ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nicht nur die angeschlagene Saite schwingt, sondern auch die von ihr in Resonanz angeregten höheren Saiten.

Auch ist die Resonanz hauptsächlich dafür verantwortlich, dass wir Musikinstrumente überhaupt hören. Würden wir eine Klaviersaite (oder eine Gitarrensaite oder eine Geigensaite) ohne Resonanzkörper spannen (z.B. zwischen zwei Stativklammern), so würden wir einen angeschlagenen Ton nur sehr leise hören. Erst dadurch, dass verschiedene Teile des Musikinstrumentes verschiedene Resonanzfrequenzen besitzen, sich von den Tönen zum Mitschwingen bewegen lassen und so selbst Schallwellen erzeugen, können wir die erzeugten Klänge hören.

Außerdem spielen Helmholtz-Resonanzen eine wichtige Rolle bei der Verstärkung des Klangs von zahlreichen Instrumenten: Helmholtz-Resonanzen beschreiben Resonanzen in eingeschlossenen Lufträumen. bläst man zum Beispiel in eine Flasche, so hört man einen Klang, zusammengesetzt aus den Eigenfrequenzen der Flasche (ein „Ton“ entsteht nur bei einem kugelförmigen Behälter, da nur kugelförmige Behälter nur eine Eigenfrequenz besitzen!), da im Flascheninneren stehende Luftwellen entstehen.

Besonders Geige und Klavier wurden in dieser Hinsicht schon eingehend untersucht, man weiß genau, welche Bauteile auf welche Frequenzen besonders gut ansprechen und wie man ein Instrument bauen muss, um ihm einen angenehmen Klang zu verleihen.

Wir sehen also, dass die Resonanz bei der Klangerzeugung von Musikinstrumenten eine wichtige Rolle spielt. Auch Experimente wie das Brechen von Glas durch Zersingen basieren auf dem Resonanzprinzip.

Lautsprecher in Bewegung – wie funktioniert ein Lautsprecher?

Aufbau:

Für diesen Versuch wurden mir zwei ausrangierte Autolautsprecher zur Verfügung gestellt. Um diese zu bespielen, bedarf es eines Signals, welches durch eine Verstärkerendstufe auf einen den Lautsprechern angepassten Spannungspegel verstärkt wurde. Hierfür bot sich ein ausrangiertes Autoradio an, welches mir ebenfalls zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Autoradio beinhaltet einen Vorstufenverstärker, welcher die Signalspannung von der Antenne auf einen Wert verstärkt, mit dem die Endstufe etwas „anfassen“ kann. Die Endstufe verstärkt dieses Signal wiederum soweit, dass die Spulen-Membran-Konstruktion im Lautsprecher bedingt durch das Induktionsprinzip zu schwingen beginnt. Man nimmt also einen der beiden mit dem Radio verbundenen Lautsprecher und legt ihn auf den „Rücken“, also so, dass die Lautsprechermembran nach oben schaut.

Um den Effekt der Membranbewegung deutlicher sichtbar zu machen, habe ich etwas Lykpodiumpulver auf der Membran verteilt und einige kleine Metallkugeln in den Lautsprechertrichter gelegt.

Durchführung:

Zur Demonstration der Membranschwingung suchte ich einen Sender, der gerade ein besonders bass- und schlagzeuglastiges Stück spielte. Dann stellte ich das Autoradio so laut ein, dass die Kügelchen im Inneren des Lautsprechertrichters zu springen begannen und das Lykpodiumpulver sich auf der Membran verteilte.

Beobachtung:



Abb. 22: Ausschnitt aus Echtzeitaufnahme „Lautsprecher in Bewegung“



Abb. 23: Ausschnitt aus High-Speed-Aufnahme „Lautsprecher in Bewegung“

In der Zeitlupenaufnahme bei 1200 fps kann man besonders gut beobachten, dass Schwingungen mit geringen Amplituden dauernd auftreten, während ein impulsartiges Signal, wie es zum Beispiel von einer Bassdrum stammt, in einer einmalig auftretenden Auslenkung mit höherer Amplitude resultiert. Diese größeren Auslenkungen bedingen ein Hin- und Herhüpfen der Metallkugeln; das Lycopodiumpulver wird nach „oben“ getragen, in Richtung Trichteröffnung.

Die Physik:

Am Häufigsten werden im Alltag Lautsprecher verwendet, die sich eines der wichtigsten Prinzipien der Elektrodynamik zunutze machen, nämlich jenes, das besagt, dass sich um einen stromdurchflossenen Leiter ein magnetisches Wirbelfeld bildet. Dies geht aus einem der fundamentalen Gesetze der Elektrizitätslehre hervor, dem Ampère'schen Gesetz:

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 * \vec{j} \quad (3.19)$$

mit \vec{B} als magnetischer Flussdichte, μ_0 magnetische Feldkonstante und \vec{j} als Stromdichte (Strom pro Fläche). „rot“ steht hier als mathematischer Operator, welcher ein Wirbelfeld bezeichnet, also ein Feld, welches keine Quelle oder Senke, keinen Anfang und kein Ende hat, sondern sich mit kreisförmigen Feldlinien ausbildet, in diesem Fall mit dem stromdurchflossenen Leiter als Zentrum. Mathematisch haben wir hier dargestellt, dass sich um einen Leiter, der von einem

Strom der Dichte \vec{j} (bzw. der Stromstärke I ; Stromdichte und Stromstärke sind verknüpft durch die Beziehung $I = \int_A \vec{j} * dA$ mit A als Leiterquerschnittsfläche) durchflossen ist, ein Magnetfeld bildet, welches folgendermaßen aussieht:

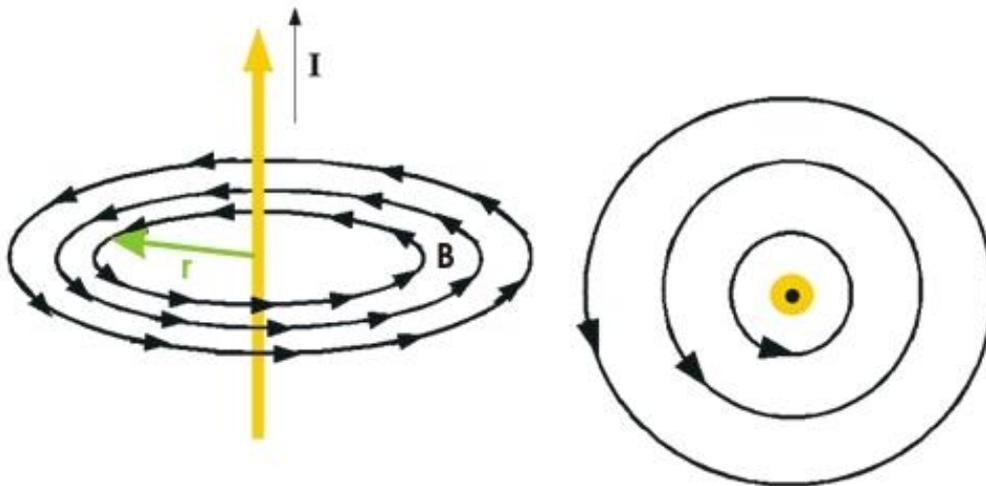


Abb. 24: Magnetfeld um stromdurchflossenen Leiter

Im linken Bildteil sehen wir einen Leiter (gelber Pfeil), welcher von einem Strom der Stärke I durchflossen wird. Um diesen Leiter bildet sich ein magnetisches Wirbelfeld der Flussdichte \vec{B} . Im rechten Bildteil sehen wir „in den Strom hinein“; der Strom fließt in unsere Richtung, für einen Beobachter in dieser Position dreht das Wirbelfeld gegen den Uhrzeigersinn.

In einem Lautsprecher machen wir uns dies in einer Konstruktion, welche im Wesentlichen aus Permanentmagneten und einer Spule besteht, zunutze:

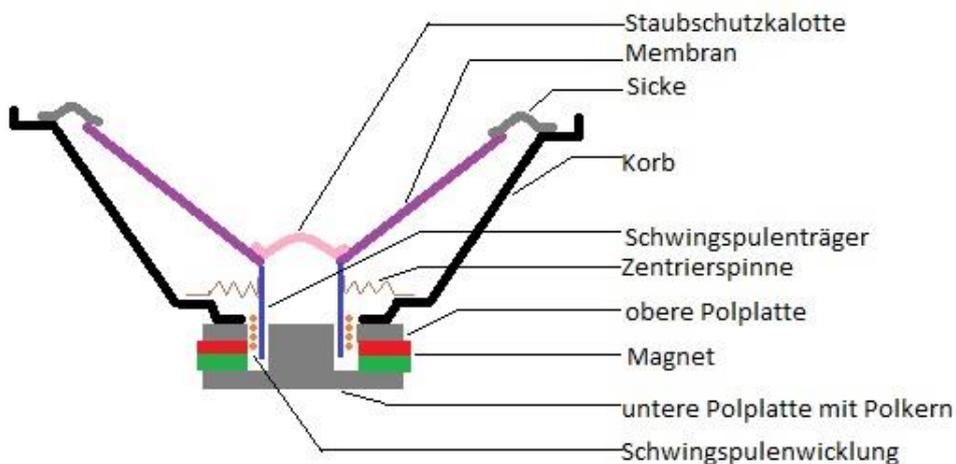


Abb. 25: Schematischer Aufbau eines dynamischen Lautsprechers

Eine Spule, welche auf ein Trägerelement gewickelt ist, wird nahe an einer Anordnung von Magneten angebracht. Die „Zentrierspinne“ verhindert das Verrutschen des Spulensystems. Das Trägerelement der Spule ist mit einer schwingfähigen Membran verbunden, das ganze System ruht im „Korb“, einer Konstruktion aus Metall oder einem anderen festen Material.

Wird nun eine Signalspannung (z.B. Musik von einer CD, von einem Verstärker auf genügend hohe Spannung gebracht) an die Spule gelegt, so fließt durch diese ein sich in Stärke und Richtung sehr oft verändernder Strom. Wie wir nun wissen, entsteht um einen stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld, welches von Stromstärke und –richtung abhängig ist. Da nun das Feld des Permanentmagneten und das entstandene Magnetfeld der Spule miteinander wechselwirken, wird die Spule, abhängig von der Stromrichtung, nach außen gedrückt oder nach innen gezogen, und zwar besonders stark bei „lautem“ Signal (größerem Stromfluss), z.B. einer Bassdrum, und weniger stark bei „leisem“ Signal (geringerem Stromfluss). Wie wir sehen, ist die Spule mit einer Membran, welche z.B. aus Pappe bestehen kann, verbunden. Diese Membran schwingt mit der Spule mit und ist verantwortlich für die in Bewegung gesetzte Luft. Die Luft als Medium wird im nächsten Versuch besprochen.

Kerze im Schallfeld:

Aufbau:

Der im vorigen Versuch verwendete Lautsprecher wird nun „aufgerichtet“ und auf einem Stativ befestigt. Vor dem Lautsprecher wird eine Kerze aufgestellt, welche dann durch die vom Lautsprecher in Bewegung versetzte Luft zu flackern beginnen wird. Bei der Wahl der Kerzenposition ist es günstiger, die Kerze nicht genau vor der Lautsprechermitte (Spule) zu positionieren, sondern 4-5 cm vom Zentrum versetzt. Hier, vor der Pappmembran, ist die Luftbewegung so stark, dass sie eher sichtbar wird als im Zentrum, wo die Spule sitzt. Dieser Umstand wird auch in der Audiotechnik ausgenutzt, wo Mikrophone zur Abnahme von Gitarren- und Bassverstärkern nie zentral vor dem Lautsprecher stehen, sondern immer ein wenig versetzt, was sich durch ein höheres Aufnahmesignal äußert.

Durchführung:

Die Kerze wird angezündet, aus dem Lautsprecher ertönt Musik; wie schon im vorigen Versuch wurde ein Stück mit hohem Bassgehalt und starker Bassdrum ausgewählt.

Beobachtung:



Abb. 26: Ausschnitt aus dem Echtzeitvideo „Kerze im Schallfeld“



Abb. 27: Kerzenflamme in Ruhe, Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Kerze im Schallfeld“



Abb. 28: Kerzenflamme in von Luftstößen des Lautsprechers hervorgerufener Bewegung
Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Kerze im Schallfeld“

Die Membran des Lautsprechers schwingt, die Flamme der Kerze „tanzt“ mit den Schwingungen der Membran mit. Schwingt die Membran nur leicht, bewegt sich auch die Kerzenflamme wenig, bei starken Lautsprechersignalen bewegt sich die Kerzenflamme stark hin und her, um dem Docht der Kerze als „Ruhelage“. Die Schwingungen der beiden Systeme sind zu jedem Zeitpunkt gleichphasig.

Die Physik:

Im vorigen Versuch wurde die Funktionsweise eines Lautsprechers behandelt. Wir wissen nun, dass elektrische Signale in einer Spule ein Magnetfeld erzeugen. Eine solche Spule befindet sich in den meisten Lautsprechern, wo dann das Spulenmagnetfeld mit dem Feld eines Permanentmagneten wechselwirkt und die Spule mit der Membran dadurch in Bewegung gerät. Diese Anordnung ist der Schallerzeuger, die Luft nimmt die Funktion des Mediums ein.

Jede mechanische Welle, so auch eine Schallwelle, benötigt ein Medium, um sich fortzubewegen (anders als elektromagnetische Wellen, die sich auch durch Vakuum bewegen können). Ohne Medium gibt es keine Schallausbreitung; lässt man einen Wecker in einem Vakuum klingeln, so hört man nichts! Das Medium kann gasförmig, flüssig oder fest sein. Wir hören an der Luft, wir hören auch im Wasser, und feste Körper leiten Schall sogar besonders gut (deshalb hört man das Getrappel oder die Waschmaschine der Nachbarn im oberen Stockwerk so gut).

Ein Schallerzeuger (wie unser Lautsprecher) regt durch seine Bewegung die Moleküle des Mediums in seiner Nähe zum Schwingen an. Durch die Bewegung nach außen „schiebt“ die Membran die Luftmoleküle in ihrer Nachbarschaft in ihre Bewegungsrichtung. Die angeschobenen Moleküle stoßen auf ihre Nachbarmoleküle und werden dadurch abgebremst. Nun bewegen sich aber die Nachbarmoleküle und stoßen ihrerseits an ihre Nachbarn. Diese „Stöße“ wiederholen sich sehr oft auf dem Weg vom Schallerzeuger zum Ohr, wo diese „Welle“ auf das Trommelfell trifft und im Innenohr in einen elektrischen Reiz umgewandelt wird, der dann zum Gehirn gelangt. In der Physik wird dies als „Longitudinalwelle“ bezeichnet, eine Wellenform, bei der das Medium in Ausbreitungsrichtung schwingt (anders als bei einer Transversalwelle, bei der das Medium normal zur Ausbreitungsrichtung schwingt).

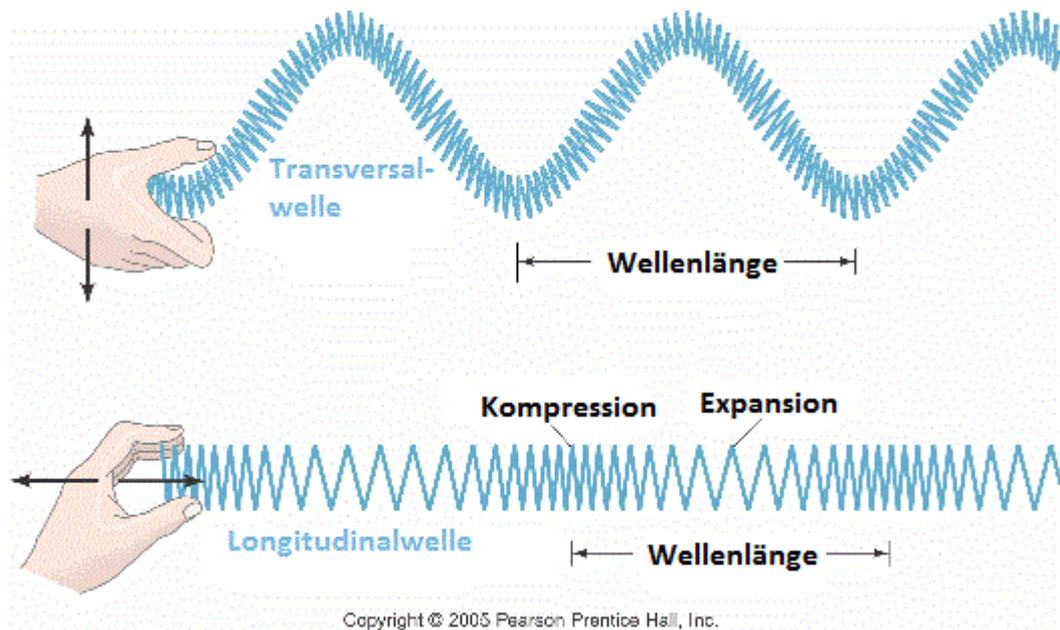


Abb. 29: Vergleich Transversalwelle - Longitudinalwelle

Eine Schallwelle als Longitudinalwelle besteht also eigentlich aus rasch aufeinander folgenden Zonen unterschiedlichen Luftdrucks. Bewegt sich die Membran des Lautsprechers nach außen, so drückt sie ein Luftpaket nach außen und die Luft verdichtet sich in diesem Moment. Dann bewegt sich die Membran wieder nach innen und ist dann bereit, ein neues Luftpaket nach außen zu drücken. Wie wir im Video gesehen haben, äußert sich dieser Ablauf wie eine rasche Abfolge von Windstößen, die auf die Kerze wirken. Doch wie oft muss die Membran schwingen, damit wir die resultierenden Luftbewegungen als Schall wahrnehmen können?

Der Mensch kann mit seinen Ohren Geräusche mit Frequenzen zwischen 16 Hz und 20 kHz wahrnehmen. Dies bedeutet, dass ein Lautsprecher zwischen 16x pro Sekunde und 20 000x pro Sekunde hin- und herschwingen muss, damit die entstehenden Wellen als Schall wahrnehmbar werden können. In der Praxis besitzt nur ein Neugeborenes dieses Hörvermögen; mit jedem Lebensjahrzehnt wandert die obere Hörgrenze nach unten – ca. um 2 kHz, sodass alte Menschen Zischlaute wie „s“ oder „z“ nicht mehr so gut hören können. Dies wird einerseits bedingt durch eine generelle „Alterschwäche“ des Gehörs, natürlich aber auch begünstigt durch Überbelastung des Gehörs – so lassen laute Musik (Besonders In-Ear-Hörer!!) und die oft recht lauten Geräusche des Alltags- und Berufslebens das Gehör leicht abstumphen.

Im Video wurde auch gezeigt, dass die Bewegung des Lautsprechers und die Bewegung der Kerze gleichzeitig passieren; die Schallgeschwindigkeit ist so groß, dass bei der Entfernung

Lautsprecher-Kerze auch bei Betrachtung in Zeitlupe keine Verzögerung der Bewegungsereignisse feststellbar ist. Die Schallgeschwindigkeit ist an der Luft abhängig von der Temperatur (je heißer, desto schneller), bei 20°C beträgt sie

$$c_{\text{Luft}} = 340 \text{ m/s}$$

Dieser Wert bezieht sich auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Welle, nicht auf die Bewegungsgeschwindigkeit der einzelnen stoßenden Moleküle. Diese beträgt nur einige cm/s. Jedoch sind die Moleküle so dicht beieinander, dass die Stöße sehr rasch aufeinanderfolgend passieren, sodass die hohe Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Schallwelle erreicht wird. Übrigens ist diese im Wasser noch viel höher:

$$c_{\text{Wasser}} = 1450 \text{ m/s}$$

Chladnische Klangfiguren:

Aufbau:

Eine eher dünne Metallplatte wird waagrecht auf einem Stativ montiert. Dann streut man eine kleine Menge feinen Sands auf die Metallplatte und verteilt diesen gleichmäßig.

Ein Geigen- / Cello- / Kontrabassbogen wird stark gespannt, mit diesem wird dann die Metallplatte zum Schwingen angeregt. Hat man ein Stück Kolophonium zur Hand, so kann man die Bogenhaare zuvor ein bisschen bestreichen. Diese werden dadurch etwas klebrig, was das Auftreten des Stick-Slip-Effekts begünstigt. Grundsätzlich ist zu empfehlen, hierfür keinen zu teuren Bogen zu verwenden, da dessen Lebensdauer durch das starke Spannen und das Anstreichen einer Metallplatte wohl eher verkürzt wird.

Durchführung:

Mit dem gespannten Bogen streicht man kräftig über den Rand der Metallplatte. So regt man diese zum Schwingen an. Mit einiger Übung lassen sich verschiedene Schwingungsmoden bzw. verschiedene Obertöne anregen, was zur Bildung verschiedener „Sandmuster“ auf der Platte führt.

Beobachtung:



Abb. 30: Ausschnitt aus dem Echtzeitvideo „Chladnische Klangfiguren“



Abb. 31: Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Chladnische Klangfiguren“

Durch den Stick-Slip-Effekt wird die Metallplatte zum Schwingen angeregt. Man hört einen recht hohen, schrillen Ton, gleichzeitig beginnen die auf der Platte verteilten Sandkörner auf der Platte herumzuspringen. Besonders gut ist dies in der 10-20-fachen Zeitlupe (600 fps, 1200 fps) erkennbar. Sie sammeln sich an bestimmten Stellen auf der Platte und bilden so ein klar erkennbares Muster. Streicht man die Platte an einer anderen Stelle und regt so einen anderen Oberton an, beginnen die Sandkörner wieder zu springen und sammeln sich an anderen Stellen auf der Platte – ein neues, anderes Muster entsteht.

Zu alledem ist in der High-Speed-Aufnahme tatsächlich zu sehen, wie die Metallplatte durch den Bogenstrich zu schwingen beginnt.

Die Physik:

Der Rand der Platte wird mit dem Bogen gestrichen, dadurch wird sie zum Schwingen angeregt. Verantwortlich hierfür ist der Stick-Slip-Effekt: Die Haare des Geigenbogens sind leicht klebrig (ein Umstand, der durch das Bestreichen mit Kolophonium, einem aus Baumharz gewonnenen Material, begünstigt wird). Streicht man nun über den Plattenrand, so bleibt dieser für sehr kurze Zeit an den Bogenhaaren kleben und bewegt sich mit diesen in Strichrichtung mit. Durch die Steifheit der Metallplatte wächst jedoch mit zunehmender Auslenkung von der Normalstellung die Rückstellkraft, jene Kraft, die die Platte wieder in ihre ursprüngliche Form bringen will. Erreicht die Auslenkung einen bestimmten Wert, so schnellt die Platte aufgrund dieser Rückstellkraft in ihre ursprüngliche Position, und dann beginnt das Ganze von neuem: Die Bogenhaare haften an der Platte, diese wird ausgelenkt, die Rückstellkraft wird größer und erreicht einen kritischen Wert usw. All dies passiert innerhalb sehr kurzer Zeit, nämlich bis zu mehrere hundert Mal pro Sekunde. Das bedeutet auch, dass die Platte mit einer Frequenz von mehreren hundert Hertz schwingt und ein entsprechender Ton zu hören ist. Der Stick-Slip-Effekt wird in der Beschreibung des Versuches „Geigensaiten“ näher erläutert.

Doch wie kommen nun die Muster auf der Platte zustande?

Schwingungsfähige Systeme (auch die Metallplatte ist ein „schwingungsfähiges System“) besitzen Resonanzfrequenzen. Wird ein solches System periodisch, also in gleichen Zeitabständen, mit seiner Resonanzfrequenz angeregt, so beginnt dieses immer stärker zu Schwingen. Welchen Wert die Resonanzfrequenz eines Systems besitzt, ist von dessen Material abhängig – steifere Materialien besitzen im Allgemeinen höhere Resonanzfrequenzen, da sie, wenn sie aus ihrer Ruhelage ausgelenkt werden, höhere Rückstellkräfte entwickeln und schneller in ihre Ausgangslage zurückkehren wollen. Weichere Materialien lassen sich weit auslenken.

Physikalisch sind den Resonanzschwingungen zum Beispiel durch Materialbedingungen Grenzen gesetzt. So kann unsere Metallplatte nicht immer stärker schwingen, weil sie eben aus Metall und deshalb recht fest und unbeweglich ist. Im extremen Resonanzfall kann eine „Resonanzkatastrophe“ auftreten: Durch die sich immer weiter verstärkenden Schwingungen wird das schwingende System zerstört. Dieser Umstand bildet zum Beispiel die Grundlage dafür, dass Brücken, über die im Gleichschritt marschiert wird, einstürzen können.

Das Phänomen der Resonanz wird im Versuchsabschnitt „Resonanzkreisel“ näher erklärt.

Wird die Metallplatte also durch den Bogen zum Schwingen mit Resonanzfrequenz gebracht, so entsteht in der Platte eine stehende Welle. Durch günstige Überlagerung von reflektierten Wellenteilen schwingen manche Bereiche der Platte sehr stark, manche jedoch überhaupt nicht, da hier die „Knoten“ der stehenden Welle sitzen (siehe hierzu auch die Beschreibung des Versuches „Wellenmaschine“). Die auf der Platte verteilten Sandkörner werden durch die Schwingungen von ihren ursprünglichen Plätzen „vertrieben“ und geraten in Unruhe. Erst sobald sie eine nicht schwingende Stelle gefunden haben, bleiben sie wieder liegen, da sie nun nicht mehr von den Schwingungen weiterbewegt werden.

Im Allgemeinen haben schwingungsfähige Systeme mehrere Resonanzfrequenzen. Die tiefstmögliche wird im akustischen Kontext als „Grundton“, die weiteren, welche sich aus ganz- bzw. (im Fall der Quint) halbzahligen Vielfachen ergeben, als „Obertöne“ bezeichnet. Je nachdem, an welcher Stelle die Platte nun zum Schwingen angeregt wird, ist es möglich, verschiedene Obertöne anzusprechen. Die Veränderung des entstehenden Tons bewirkt auch eine Veränderung des entstehenden Körnermusters, da bei verschiedenen Tönen die Schwingungsknoten an verschiedenen Stellen der Platte liegen.

Schlag auf Schlagzeugbecken:

Aufbau:

Ein Crash-Becken steht auf einem Beckenstativ. Crash-Becken haben im Gegensatz zu den größeren und schwereren Ride-Becken einen sehr hellen, durchdringenden Klang, was darauf schließen lässt, dass die Obertöne sehr stark ausgeprägt sind. Diese Art von Becken wird vor allem in Rock, Pop und Jazz zur Setzung besonderer Akzente verwendet.

Ein wenig Mehl auf dem Becken lässt einerseits spektakuläre Bilder entstehen, andererseits kann man die Entstehung von Schallwellen sichtbar machen, wie wir sehen werden.

Durchführung:

Mit einem gewöhnlichen Drumstick wird auf das Becken geschlagen. Durch den Schlag entsteht ein lautes, klirrendes Geräusch, welches sofort nach dem Schlag abzuklingen beginnt. In der normalen Wahrnehmung erscheint die Abklingzeit nicht besonders lang (max. einige Sekunden), mit der eingestellten Aufnahmezeit von 1200 fps (40-fache Zeitlupe) erhält man so ein Video mit einer Länge von zwei bis vier Minuten.

Beobachtung:



Abb. 32: Crash-Becken kurz nach dem Schlag.

Die vom Aufschlagpunkt ausgehende Welle ist gut zu erkennen, das Becken verbiegt sich im rechten Bildteil erkennbar.

Der Schlag auf das Becken bewirkt eine Welle, die, ausgehend vom Anschlagpunkt, auf dem Becken rund um den Auflagepunkt in der Beckenmitte weiterwandert. Dies ist daran zu erkennen, dass zunächst das Mehl in der Nähe des Anschlagpunktes, erst einen Augenblick später das Mehl auf der weiter entfernten Seite des Beckens hochgeschleudert wird. Sobald das Becken nach dem Anschlag zum ersten Mal zurück nach oben schwingt, ist auf der linken Seite des Bildes zu sehen, wie Mehlportionen im Rhythmus der Wellenbewegung vom Beckenrand gestoßen werden. Insgesamt scheint das Becken, gleichmäßig zu schwingen – verschiedene Beckenbereiche vollführen periodische wiederkehrende Bewegungen.

Die Physik:

Der Klang von Crash-Becken ist sehr durchdringend - Aufnahmen des Frequenzspektrums solcher Becken zeigen, dass große Teile der erzeugten Frequenzen in Bereichen liegen, die wir als „hoch“ empfinden. Auch können wir eigentlich nicht mehr von Klang sprechen, da das Frequenzspektrum sehr viele verschiedene Frequenzen aufweist, nicht nur einen Grundton und seine Obertöne als bestimmte Vielfache der Grundfrequenz. Deshalb erscheint der Begriff „Geräusch“ passender.

Das Schwingverhalten von Becken wurde soweit untersucht, dass man bestimmte Bereiche des emittierten Spektrums bestimmten Schwingungsmoden zuordnen kann. So existieren Schwingungsmoden, welche für eher tiefe Frequenzbereiche „zuständig“ sind; die ersten 5-6 Moden besitzen „Radialknoten“, welche von der Beckenmitte (Auflagepunkt) zum Rand verlaufen. Für höhere Frequenzen vermischen die Schwingungsmoden häufig miteinander, sodass die Identifikation der Zugehörigkeit einzelner Moden schwieriger wird.

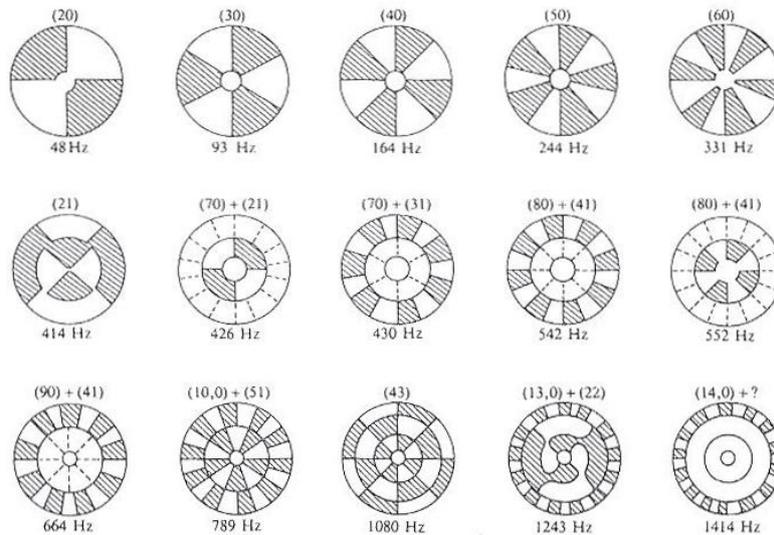


Abb. 33: Die Schwingungsmoden eines 38-cm-Beckens

Im Zeitlupenvideo ist zu sehen, dass die umlaufende Welle sehr lange anhält – dies manifestiert sich in der Audioaufnahme von Schlagzeugbecken, wo die tiefen Frequenzen relativ lange nachklingen.

Höhere Frequenzbereiche, wie z.B. der für den Klangeindruck wichtige Bereich von 3-5 kHz, erreichen ca. 50-100 ms nach dem Schlag ihren Peak und beginnen dann mit dem Abklingen [7].

Schlag auf Snare-Drum:

Aufbau:

Eine Snare Drum steht auf einem Ständer; die Membran wird leicht mit Wasser benetzt.

Durchführung:

Mit einem Drumstick schlägt man auf die Snare Drum.

Beobachtung:



Abb. 34: Ausschnitt aus dem Video „Schlag auf Snare-Drum“

In der 20- bzw. 40-fachen Zeitlupe ist das Schwingen der Membran leicht erkennbar. Auch ist zu sehen, wie aus der dünnen Wasserschicht auf der Membran zahlreiche Tropfen entspringen, welche durch die Schwingung der Membran hoch in die Luft geschleudert werden. Die Membran selbst schwingt sehr schnell und andererseits auch sehr kurz – auch in der Zeitlupenaufnahme erscheint das Schwingen sehr schnell, und als die hochgeworfenen Wassertropfen zu Boden fallen, hat die Membran längst zu schwingen aufgehört.

Die Physik:

Die Physik von Schlaginstrumenten wurde eingängig erforscht. So ist es möglich, verschiedenen Frequenzbereichen im Frequenzspektrum eines Trommelschlages einzelne Zonen der Membran, welche auf eine charakteristische Art schwingen, zuzuordnen. Diese Verknüpfung zwischen Membranzonen und Frequenzbereichen kennt man als „Moden“. Die Überlagerung solcher „Moden“ ergibt dann das charakteristische Schwingungsverhalten einer Membran und die charakteristischen Frequenz- bzw. Oberschwingungsverhältnisse. Schläge auf Snare Drums sind echte Geräuschereignisse – es ist keine Tonhöhe erkennbar, auch

das Frequenzspektrum zeigt keine auffallenden Peaks. Jedoch erwartet das menschliche Ohr von einer Snare Drum einen bestimmten Klang, und so behilft man sich in der Audiotechnik bei der Produktion von Snare Drum-Klängen mit der Anhebung bzw. der Absenkung bestimmter Frequenzbereiche. So wird zum Beispiel der Bereich rund um 5 kHz leicht angehoben bzw. verstärkt; dieser Frequenzbereich ist für uns als das klassische „Knacken“ der Snare hörbar.

Bei gestimmten Schlaginstrumenten wie Pauken oder Marimbaphonen herrschen andere Frequenzverhältnisse vor. Wie auch bei Saiten- oder Blasinstrumenten lassen sich hier im grafisch dargestellten Frequenzspektrum verschiedene Obertonverhältnisse in Form regelmäßiger Frequenzpeaks erkennen.

Snare Drums funktionieren nach dem folgenden Prinzip:

Die Trommel ist auf beiden Seiten mit Membranen bespannt. An der unteren Membran liegt die „Snare“ an, ein feines Drahtgeflecht, welches an den Trommelrändern über die Membran gespannt wird. Schlägt man nun auf die obere Membran und regt diese so zum Schwingen an, wird die Luft im Inneren der Trommel in periodischen Abständen komprimiert und dekomprimiert. Die Schwingung der oberen Membran pflanzt sich durch die Luft zur unteren Membran fort, welche dadurch ebenfalls zum Schwingen angeregt wird. Bei idealer „Snare“-Spannung löst sich diese hierbei zu bestimmten Zeitpunkten im Schwingungsverlauf, um dann durch die Rückstellkraft in Richtung Membran getrieben zu werden. Trifft die „Snare“ dann auf diese auf, hören wir das bekannte Geräusch der Snare Drum.

Eine detaillierte Aufarbeitung und Analyse von Klängen gestimmter Schlaginstrumente unter Zuhilfenahme der Casio Exilim High-Speed-Kamera erfolgt im nächsten Kapitel.

Gestrichene Geigensaite – der Stick-Slip-Effekt:

Aufbau:

Eine Geige wird mit Stativmaterial am Hals so fixiert, dass sie beim Streichen nicht verrutschen kann. Es ist hierbei empfehlenswert, weiche bzw. gepolsterte Klemmen zu verwenden, um den Hals nicht zu beschädigen, weiters sollte man natürlich keine Stradivari einspannen, ein

günstigeres Fabrikat tut es auch. Ein Geigenbogen wird zum Streichen der Saiten benötigt, eventuell sollte man die Haare des Bogens zuerst mit Kolophonium einstreichen.

Durchführung.

Mit dem Geigenbogen streicht man über die Saiten der Geige. Besonders gut sichtbar wird in der High-Speed-Aufnahme die Schwingung der G-Saite; einerseits, weil diese dicker ist als die anderen Saiten, andererseits, weil sie tiefer klingt und damit pro Sekunde seltener schwingt als die anderen Saiten.

Beobachtung:



Abb. 35: Schwingung einer Geigensaite, Schnappschuss aus dem dazugehörigen Video.
Die Auslenkung der G-Saite ist auf dem Bild gut zu erkennen.

Nach einer kurzen „Anstreichzeit“ beginnt der Stick-Slip-Effekt zu wirken. Die Saitenschwingung ist besonders gut in der Aufnahme mit 1200 fps gut zu beobachten. Sie ist nicht innerhalb eines Augenblicks voll ausgeprägt sondern benötigt einige Zeit, um sich voll zu entfalten. Hebt man den Bogen vom Griffbrett, so schwingt die Saite noch einige Zeit nach (jedoch kürzer als z.B. die Saiten der Gitarre, welche ein ausgeprägteres „Sustain“ besitzt und länger nachklingt).

Die Physik:

Die Anregung der Saiten der Geige basiert auf dem Prinzip des Stick-Slip-Effekts. Dieser wird im Folgenden näher erklärt. Um die „Aufschaukelung“ der Schwingung zu verstehen, müssen wir uns auch mit dem Begriff der Resonanz beschäftigen – diese ist im Versuchsabschnitt „Resonanzkreisel“ näher beschrieben.

Der Stick-Slip-Effekt kommt zustande, wenn die Haare des Geigenbogens über ein schwingfähiges Material streichen und dieses jeweils für kurze Augenblicke kleben bleibt. Im Falle der Geige sind dies die Saiten, jedoch basiert auch die mit einem Geigenbogen durchgeführte Anregung der Metallplatten, welche zur Demonstration der Chladni'schen Klangfiguren verwendet werden, auf diesem Effekt. Verantwortlich hierfür ist eine Kraft, welche als „Haftreibung“ bezeichnet wird. Sie verhindert, dass sich Haare und Saiten aneinander vorbeigleiten, sondern aneinander kleben, wodurch die Saite sich in Strichrichtung mitbewegt. Durch ihre Steifheit (die Saiten der Geige bestehen aus Metall) wächst jedoch mit zunehmender Auslenkung von der Normalstellung die Rückstellkraft; jene Kraft, die die Saite wieder an ihre ursprüngliche Position bringen will. Sobald diese Rückstellkraft größer als die Haftreibungskraft wird, rutscht die Saite von den Haaren ab und schwingt um ihre Ruhelage, bis sie wieder von den Bogenhaaren mitgenommen werden kann.

Hermann von Helmholtz beobachtete, dass die Schwingung durch die rasche Abfolge von Haften und Gleiten die Form einer Sägezahnwelle annimmt. An der Stelle des Anstrichs entsteht ein Knick, der über die gesamte Saitenlänge läuft, an den fixierten Punkten der Saite (Sattel bzw. Steg) reflektiert wird und phasenverschoben wieder zurückläuft. Dies geschieht so schnell, dass es auch in der High-Speed-Aufnahme mit der verwendeten Kamera nicht erkennbar ist – wir sehen lediglich die „Einhüllende“ der Knickwelle:

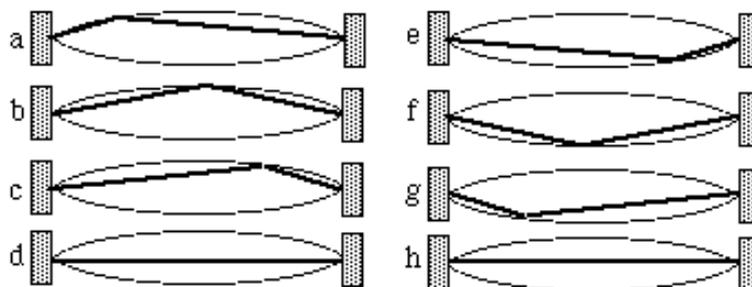


Abb. 36: Fortpflanzung der Auslenkung einer Geigensaiten,
schematische Darstellung

Die oben dargestellte Ausbreitung der Störung als Knickwelle ergibt das charakteristische Obertonverhalten der Geige. Der Bogen streicht die Saite kontinuierlich, das bedeutet, in periodischen Abständen werden neue Knickwellen erzeugt, sodass der Obertonreichtum während der ganzen Tonlänge erhalten bleibt (anders als bei der Gitarre, wie wir im nächsten Versuchsabschnitt sehen werden).

Besonders wichtig für den Stick-Slip-Effekt ist der oben erwähnte Knick daher auch deswegen, weil er, sobald er auf dem Weg vom Steg zum Sattel an der Stelle des Bogens angekommen ist, der Saite einen „Ruck“ gibt, der bewirkt, dass die Saite nach ihrer Schwingphase wieder in eine Klebphase übergeht. Am umgekehrten Weg (Sattel→Steg) erfährt die Saite einen Ruck in die entgegengesetzte Richtung, welcher das schnellere Ablösen von den Bogenhaaren bewirkt.

Bedingt durch diese sich periodisch wiederholenden Vorgänge schwingen die gestrichenen Saiten mit ihren jeweiligen Eigenfrequenzen (abhängig auch von der Länge der Saite, also wo am Griffbrett der Geiger die Saite fixiert). Die so hervorgerufenen Wellen treten mit verschiedenen Bauteilen der Geige in Resonanz, wodurch diese ebenfalls zu schwingen beginnen und so Energie in Form von Longitudinalwellen an die Luft abgeben. Die Rolle der Luft als Medium wird im Versuchsabschnitt „Kerze im Schallfeld“ näher erläutert.

Der Stick-Slip-Effekt beschränkt sich nicht auf Saiteninstrumente. Er tritt überall, wo Materialien aneinander reiben, häufig auf, ist dabei aber selten erwünscht, zum Beispiel, wenn ein Stück Metall über eine Gummidichtung gleiten soll, diese jedoch ein gleichmäßiges Gleiten verhindert. Besonders gut fühlbar ist der Stick-Slip-Effekt, wenn man mit Daumen und Zeigefinger ein Gummiband einzwängt und dann versucht, daran entlang zu rutschen.

Anschlagen von Gitarrensaiten mittels eines Plektrums:

Versuchsaufbau:

Zur Demonstration der Anregung einer Saitenschwingung wurde die Testgitarre mittels Stativmaterial auf einer Auflage fixiert.

Leer angeschlagen schwingt die A-Saite mit einer Frequenz von $\nu_A = 110$ Hz. Die leere D-Saite schwingt mit $\nu_A = 146,83$ Hz. Zur Demonstration der Schwingungsverhältnisse wurde auf der D-Saite im 7. Bund ein a gegriffen, was dann einen Unterschied von einer Oktav zur leer angeschlagenen A-Saite darstellt, das heißt $\nu_a = 220$ Hz. Um auch die Grundschwingung des a angemessen auflösen zu können, wurde an der Kamera eine Bildrate von 1200 fps eingestellt. Nach einigem Herumprobieren wurde die Gitarre um vier Halbtöne tiefergestimmt, sodass die A-Saite nunmehr als F klingt ($\nu_F = \text{ca. } 87$ Hz).

Durchführung:

Die A-(nunmehr F-)Saite der eingespannten Gitarre wird angeschlagen; kurz darauf wird der siebende Bund der nächstunteren (nunmehr B-)Saite gegriffen und angeschlagen. Es erklingt nun die Oktave des ersten angeschlagenen Tons, also A-a..

Beobachtung:



Abb. 37: Schnappschuss aus dem Video „Schwingende Gitarrensaite“.

Die Auslenkung der A-Saite ist im Bild gut zu erkennen.

Beim Anschlagen des ersten Tons (F) zeigt sich ein charakteristisches Saitenverhalten. Die durch das Plektrum beim Anschlagen hervorgerufene Deformation pflanzt sich, sobald man das Plektrum wegzieht, als Welle in der Saite fort und wird an den jeweiligen Fixierpunkten (Steg und Sattel) gegenläufig reflektiert. Damit verhält sich die Gitarrensaite ganz ähnlich wie die Geigensaite, welche im vorigen Versuchsabschnitt beschrieben wurde. Die Saiten der Geige klingen so hoch, dass die Saitenschwingungen mit der verwendeten Kamera nicht dargestellt werden können. Die heruntergestimmte Gitarre ermöglicht die Betrachtung dieser Vorgänge einigermaßen.

Auch sehen wir bewiesen, dass die das Frequenzverhältnis Grundton-Oktave 1:2 beträgt.

Die Physik:

Wie erwähnt, sehen wir den umlaufenden „Knick“, welcher sich, induziert durch das Plektrum, als Transversalwelle durch die Saite fortpflanzt und an den fixierten Enden reflektiert und phasenverkehrt wird.

Die so erzeugten Schwingungen der Saite treten mit Bauteilen der Gitarre in Resonanz*; dadurch beginnen diese ebenfalls zu schwingen, was sich verstärkend auf den hörbaren Klang auswirkt.

Es existiert jedoch ein wesentlicher Unterschied zwischen der Anregung der Saite durch einen Bogen und der Anregung durch Zupfen: beim Bogen werden, wie im vorigen Kapitel erwähnt, die Saiten in kontinuierlichen Abständen erneut zum Schwingen angeregt, der Bogen erzeugt in periodischen Abständen die erwähnten „Knicke“. Bei der Gitarre hingegen wird die Saite nur einmal pro gespieltem Ton angeregt. Der so induzierte Knick gibt bei seinem Umlauf als Welle um die Saite bzw. bei der Reflexion an den fixierten Enden Energie ab und wird schwächer. Deshalb ist der Obertonreichtum des Gitarrentons kurz nach dem Anschlag am höchsten und nimmt dann kontinuierlich ab.

*Anm.: Auch für den Klang der E-Gitarre spielt Resonanz eine große Rolle, auch wenn man dies, bedingt durch die Klangerzeugung durch magnetische Tonabnehmer (Induktion) nicht vermuten möchte. Besonders die Dauer des Tons bzw. der Nachklang (Sustain) wird durch Resonanz der Bauteile der Gitarre merklich verlängert, was auf eine Art Rückkopplung der Resonanz zurückzuführen ist.

3.2 Wasser – High Speed

Wassertropfen:

Der folgende Abschnitt befasst sich mit Wassertropfen im Allgemeinen – wie sie entstehen, wie sie ihre Form erlangen (Fallende Tropfen haben tatsächlich KEINE Tropfenform, wie vielfach fälschlich angenommen), und was passiert, wenn sie auftreffen. Zur Analyse wurden mit der High-Speed-Kamera zwei Videos aufgenommen. Eines zeigt einen tropfenden Gardena-Wasserhahn aus nächster Nähe, das andere eine glatte Metallplatte, auf welche einige Wassertropfen fallen gelassen wurden.

Zunächst also der tropfende Wasserhahn.

Aufbau:

Ein Wasserhahn mit Gardena-Aufsatz wird gerade so weit aufgedreht, dass er in konstanten Zeitabständen Tropfen verliert. Diese Intervalle sollen nicht zu lang sein, da das Filmen mit High-Speed-Kameras ohnehin sehr lange Videos hervorbringt und ein Zeitabstand von 3 Sekunden zwischen zwei Tropfen sich im Video als minutenlanges Standbild zeigt. Die Kamera fokussiert auf den Wasserhahn, jedoch so, dass man den fallenden Tropfen noch ein Stück weit mitverfolgen kann.

Durchführung:

Wasserhahn tropft, Kamera filmt.

Beobachtung:



Abb. 38: Wassertropfen löst sich von Hahn ab,
Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Wassertropfen“

Schon eine Zeitauflösung von 600 fps ist sehr aufschlussreich: fallende Tropfen sind RUND. Das austretende Wasser wird von der Gravitation nach unten gezogen. Mit zunehmendem Gewicht kann es sich nicht mehr am Hahn halten und fällt als runder Tropfen nach unten. In der Auflösung mit 1200 fps sieht man weiters, dass der Tropfen nach dem Abreißen nicht in seiner Form ruht sondern periodisch um eine Ruhelage schwingt. Auch sieht man nach JEDEM großen Tropfen, der nach unten fällt, einen weiteren kleinen Tropfen nachfolgen – dieser ist das „Abrissprodukt“, eine kleine Menge Wasser, die vom Tropfen nach unten gezogen wird, jedoch bei der Ablösung nicht an ihm haften bleibt.

Die Physik:

Die Grundannahme der meisten Menschen ist, dass Tropfen tropfenförmig sind (schon in der Existenz dieses Wortes sieht man, wie weit verbreitet diese Annahme ist). Der tropfenförmige Tropfen hat sogar auch im Logo des Instituts für Meteorologie der BOKU Wien Einzug gehalten. Tatsächlich besitzen Tropfen ja beinahe die klassische Tropfenform, solange sie am Hahn hängen, sobald sie jedoch runterfallen, nehmen sie eine kugelförmige Form an. In jedem dieser verschiedenen Abschnitte im „Leben“ eines Tropfens spielt die Oberflächenspannung eine große Rolle.

Die Oberflächenspannung ist ein Phänomen, das man bei Flüssigkeiten mit dem freien Auge beobachten kann. Die Kapillarkapillare, das Befüllen von Gläsern bis ÜBER den Rand (die Flüssigkeit bildet einen kleinen „Gupf“) sowie eben die Form von Tropfen sind allesamt auf die Oberflächenspannung zurückzuführen. Um sie aber zu verstehen, müssen wir Flüssigkeiten auf molekularer Ebene betrachten.

Die Moleküle von Flüssigkeiten verhalten sich gegenüber ihren Nachbarmolekülen anders als gegenüber weit entfernten ($>$ mehrere Moleküldurchmesser) Molekülen; „Nachbarn“ unterwerfen sich einer „Nahordnung“, während es faktisch keine „Fernordnung“ gibt. Deshalb lassen sich Flüssigkeiten sehr leicht verformen. Steckt man den Finger in eine Wanne voll Wasser, so lassen sich die Moleküle an der Stelle einfach zur Seite schieben, anders als bei einem Festkörper (zum Beispiel einem Stück Holz oder Stein), wo die Moleküle in einer starren Struktur, der Kristallstruktur, angeordnet sind, welche eine „Fernordnung“ darstellt und eine hohe Steifigkeit bewirkt. Bedingt durch diese Steifigkeit lassen sich die meisten Festkörper nur schwer verformen.

Die „Nahordnung“ der Flüssigkeit wird durch eine Kraft charakterisiert, welche die einzelnen Moleküle aufeinander ausüben, die Kohäsionskraft. Im Inneren einer Flüssigkeit wirken diese Kräfte von allen Seiten gleichermaßen auf ein Molekül (da ja rundherum überall andere Moleküle sind), die resultierende Kraft ist gleich Null. Befindet sich ein Molekül aber an der Oberfläche, so wirken von außerhalb der Flüssigkeit keine Kräfte auf das Molekül, ausgehend von den Nachbarn im Inneren jedoch sehr wohl. Die folgende Grafik soll dies veranschaulichen:

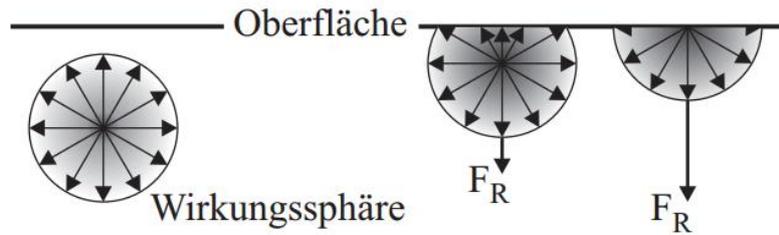


Abb. 39: Kräfte in Flüssigkeiten

Die resultierende Kraft zieht das Molekül an der Oberfläche ein wenig nach innen, in Richtung der Nachbarmoleküle. Dies passiert so oft, bis sich an der Oberfläche so wenige Moleküle wie möglich befinden. Die Oberfläche wurde so minimiert, sie nimmt also den „kleinstmöglichen Wert“ an! Die kleinstmögliche Oberfläche eines Körpers ist immer die Kugelform. So sind z.B. die Mineralwasserflaschen der Firma „Vöslauer“ ($V=1\text{ l}$) besonders platz- und materialsparend, weil sie eher runde Form haben als die langen, schmalen Flaschen gleichen Volumens, welche von anderen Herstellern verwendet werden.

Woher kommt aber der Begriff „Oberflächenspannung“?

Möchte man die Oberfläche einer Flüssigkeit vergrößern, so muss die Flüssigkeit ihre „Idealform“ verlassen, wir verformen die Flüssigkeit, indem wir einige Moleküle im Inneren zwingen, nach außen zu wandern, damit die Oberfläche größer wird. Für das Herausholen der Moleküle aus dem Inneren muss man Arbeit leisten:

$$\Delta W = \Delta A \cdot \sigma \quad (3.20)$$

ΔW steht hier für Arbeit, die man leisten muss, wenn man die Oberfläche der Flüssigkeit um die Fläche ΔA vergrößern will. Diese Arbeit ist proportional zur Oberflächenspannung σ , welche für verschiedene Flüssigkeiten verschiedene Werte annimmt. Die obenstehende Formel kann man nach σ umformen:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A} \quad (3.21)$$

Zur Messung der Oberflächenspannung durch Vergrößerung der Oberfläche gibt es mehrere Möglichkeiten, z.B. das Aufsetzen eines Metallbügels auf die Oberfläche der Flüssigkeit. Durch Nach-Oben-Ziehen des Bügels verformt sich die Oberfläche, die Zugkraft am Metallbügel ist mittels einer Feder messbar.

Ein fallender Wassertropfen wird also nie nach oben spitz zusammenlaufen, wie allgemein angenommen, da die Oberflächenspannung die runde Form bedingt. Größere Tropfen können durch den Luftwiderstand etwas gestaucht werden und so eine eher flache Form annehmen, die der Form eines Brötchens ähnelt und noch weiter von der spitz zulaufenden „Tropfenform“ entfernt ist.

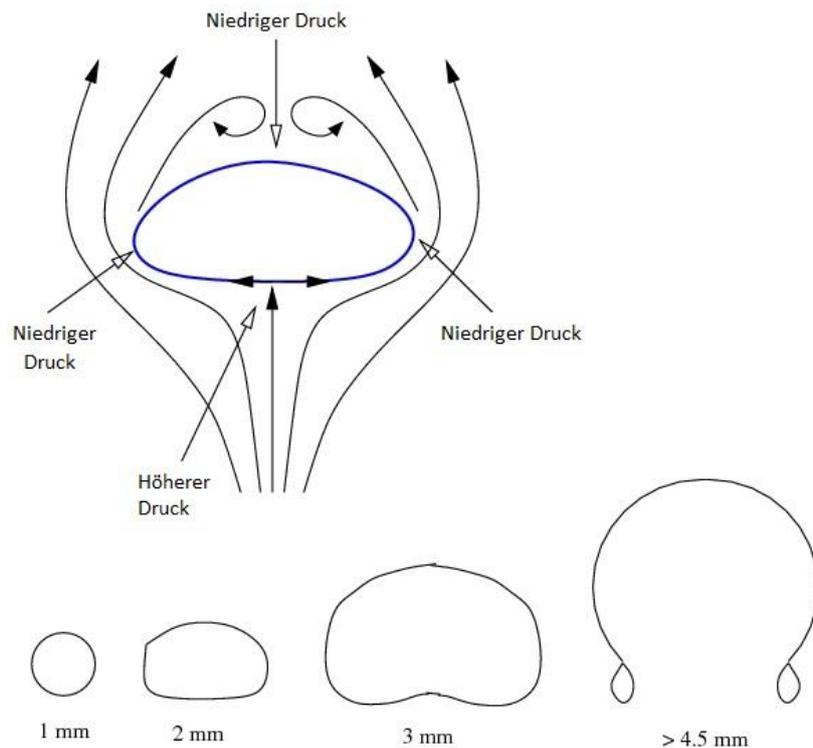


Abb. 40: Tropfenformen in Abhängigkeit der Größe

Im Bild sehen wir verschiedene mögliche Formen, welche Wassertropfen annehmen können, in Abhängigkeit der Größe bzw. des Durchmessers. Die Pfeile symbolisieren die Luftströmung um den Tropfen (der „Fahrtwind“ beim Fallen).

Wir kommen zum zweiten Teil des Versuchs: Wassertropfen treffen auf dem Boden auf.

Aufbau:

Eine Metallplatte liegt, vom Sonnenlicht beschienen, auf dem Boden. Von einem Gartenschlauch tropfen einige Wassertropfen herunter.

Durchführung:

Die Kamera ist flach auf die Metallplatte gerichtet, sodass die fallenden und auftreffenden Wassertropfen gut zu sehen sind. Mit einer Zeitauflösung von 1200 fps lassen sich aufschlussreiche Resultate erzielen.

Beobachtung:

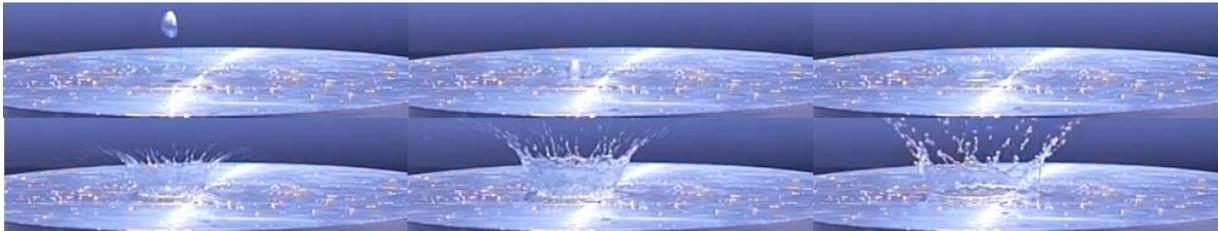


Abb. 41: Tropfen trifft auf Metallplatte

Auch in diesem Video (und besonders in den daraus erzeugten Schnappschüssen) können wir sehen, dass Wassertropfen weitgehend rund sind. Beim Aufprall verhalten sich die Tropfen unterschiedlich; der jeweils erste Tropfen zerplatzt nicht, sondern zerrinnt sehr schnell auf der Metallplatte, und zwar sofort nach dem Aufprall. Dies können wir sowohl bei 600 fps als auch bei 1200 fps beobachten. Die weiteren Tropfen fallen auf Wasser, da ja der erste Tropfen die zuvor trockene Oberfläche benetzt hat. Sie zerplatzen zu kleineren Tropfen, welche radial nach außen spritzen, mit der Aufprallstelle als Kreismittelpunkt.

Die Physik:

Im Video ist zu sehen, dass der erste Tropfen nicht zerplatzt und zerstäubt, sondern an der Metalloberfläche zerrinnt. Dies erscheint logisch, denn natürlich verformt sich der vormals runde Tropfen, sobald er auf die harte Metalloberfläche trifft, beim Abbremsen. Das Wasser drängt beim Aufprall radial nach außen, seine Ausdehnung und damit seine Oberfläche verringern sich aber gleich darauf. Das Wasser zieht sich wieder ein wenig zusammen und bildet eine geschlossene Oberfläche, wie im Video zu sehen ist. Dieses „Zusammenziehen“ ist auf die Oberflächenspannung, welche in diesem Versuchsabschnitt weiter oben erklärt wurde, zurückzuführen – das Wasser strebt nach kleinstmöglicher Oberfläche. Somit hat sich auf der Metallplatte ein „Film“ aus Wasser gebildet. Der nächste Tropfen wird also nicht mehr auf Metall prallen, sondern auf diesen Wasserfilm. Es ist zu sehen, dass der zweite Tropfen (und alle darauf folgenden) nicht wie zuvor der erste Tropfen auf der Oberfläche zerrinnt, sondern

richtig zerplatzt und etliche Wassertropfen in alle Richtungen radial vom Einschlagpunkt davonfliegen. Tatsächlich spritzt hier nicht nur das Wasser des auftreffenden Tropfens, sondern, ähnlich wie beim Versuch „Wassertropfen / Huygens'sches Prinzip“, auch das schon auf der Platte vorhandene, vom Auftreffen des Tropfens verdrängte Wasser. Durch das Auftreffen des Tropfens bildet sich nämlich ein Wulst aus Wasser, quasi ein sehr schmaler und hoher Wellenberg, welcher sich radial vom Aufschlagspunkt nach außen bewegt. Am oberen Rand dieses sich bewegenden Wulstes reißen die beobachteten Tropfen ab und fliegen nach „außen“ weg. Durch die Bildung des sich bewegenden Wulstes „fehlt“ im Aufschlagszentrum ein wenig Wasser, und sobald sich der Wulst zurückbildet, bewirkt die Oberflächenspannung, dass sich das Wasser zusammenzieht und eine glatte Oberfläche bildet (wie schon beim ersten beobachteten Tropfen).

Wasserballon:

Aufbau:

Ein Luftballon wird mit Wasser gefüllt und verschlossen. Es ist darauf zu achten, den Ballon nur so weit zu füllen, dass er an einem Stativ aufgehängt werden kann, ohne dass die Ballonhülle durch das Gewicht des Wassers reißt.

Der Luftballon wird aufgehängt, eine Nadel zum Anstechen der Hülle liegt bereit.

Durchführung:

Der Ballon wird mit der Nadel angestochen. Der Versuch sollte unbedingt im Freien durchgeführt werden, da erhebliche Wassermengen auf dem Boden auftreffen.

Beobachtung:



Abb. 42: Mit Wasser gefüllter Ballon zerplatzt

Bei einer Zeitauflösung von 600 fps (20-fache Zeitlupe) ist zu sehen, wie sich die Ballonhülle, sobald sie angestochen wird, zusammenzieht – der Vorgang des Platzens in Zeitlupe.

Das im Ballon enthaltene Wasser spritzt nicht wild durch die Gegend, sondern behält die Form, die ihm der Ballon bis dahin aufgezwungen hat. Nur wenige Tropfen werden von der reißenden Gummihülle des Ballons mitgenommen, der große Rest fällt als großer Tropfen zu Boden.

Die Physik:

Beim Füllen mit Wasser dehnt sich die elastische Hülle des Ballons stark aus. Beim Anstechen entsteht ein kleines Loch, welches sich rasch vergrößert. Die gespannte Hülle zieht sich sehr schnell zusammen. Übrig bleibt der große Wassertropfen, der die Form des Ballons beibehält und scheinbar sehr langsam in Richtung Boden zu fallen beginnt. Ursache hierfür ist die Trägheit.

Die Trägheit ist eines der grundlegendsten Phänomene der klassischen Mechanik. Der Begriff Trägheit kommt im „Trägheitsgesetz“ vor, dem ersten der drei Newton'schen Axiome:

„Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen, geradlinigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn wirkt.“ [8]

Oder, mathematisch ausgedrückt:

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} \vec{p} = 0 \quad (3.22)$$

mit $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$ als Impuls. Die Änderung des Impulses beschreibt also die Änderung der Geschwindigkeit einer Masse m mit der Zeit. Die Änderung der Geschwindigkeit mit der Zeit kennt man als Beschleunigung \vec{a} , und so können wir 3.22 auch in einer wohlbekannteren Form angeben:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (3.23)$$

... Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung.

Das erste Newton'sche Axiom sagt also einerseits aus, dass ein Körper, der sich gleichförmig und geradlinig in eine Richtung bewegt, seine Bewegungsrichtung und –geschwindigkeit nur durch eine auf ihn wirkende Kraft ändern kann (Auch eine Kurvenbahn ist eine solche „erzwungene“ Bahn, die man nur durch Kraftaufwand erreichen kann!), andererseits, dass ein ruhender Körper sich erst dann zu bewegen beginnt, wenn eine Kraft auf ihn wirkt. Genau dies ist beim großen Wassertropfen nach dem Platzen des Ballons der Fall. Solange das Wasser im Ballon ist, herrscht ein Kräftegleichgewicht zwischen Erdanziehungskraft \vec{F}_g und der Zugkraft des Ballons \vec{F}_B :

$$\vec{F}_g = \vec{F}_B \quad (3.24)$$

Auch auf jeden Punkt der Ballonhülle wirkt eine Kraft, eine Zugkraft, welche aus der Spannung des Materials resultiert. Da aber die Zugkraft aus jeder Richtung gleich ist, ist die Gesamtkraft auf einen beliebigen Punkt gleich 0, die Hülle befindet sich im Kräftegleichgewicht. Sobald jedoch ein Loch in der Ballonhülle erzeugt wird, verändert sich das Kräfteverhältnis, und die Spannkraft ist nicht mehr aus jeder Richtung die gleiche. Dies führt zum Aufreißen und Zusammenziehen der Hülle. All dies geht sehr schnell; auch mit der High-Speed-Kamera bei 1200 fps ist die Bewegung der Hülle kaum wahrnehmbar. Hier kommt die Trägheit ins Spiel. Die Masse der Ballonhülle ist klein im Verhältnis zur auf sie wirkenden Spannkraft. Deshalb zieht sie sich sofort und mit großer Geschwindigkeit zusammen. Das Wasser besitzt eine größere Trägheit und lässt sich von der zusammenziehenden Ballonhülle kaum beeinflussen. Deshalb bleibt die Ballonform des Tropfens zunächst erhalten. Zum Zeitpunkt $t = 0$ s, dem Zeitpunkt, wo das Wasser von der Ballonhülle „freigegeben“ wird,

beträgt die Geschwindigkeit 0 m/s; dann beschleunigt das Wasser scheinbar langsam in Richtung Erde. Diese gegenüber der Ballonhüllenbewegung langsame Beschleunigung sowie die erhaltene Tropfenform lassen den Eindruck eines kurzzeitig stehenden Tropfens erhalten.

Wasserballon / Luftdruckprojektil:

Im nächsten Ballonversuch wurde ein Wasserballon an einem Stativ (einer Dachlatte) befestigt; dieser Ballon wurde dann mit einem Luftdruckprojektil durchschossen. In diesem Versuch bemühte ich mich vor allem, das Projektil bzw. seine Bahn im Video sichtbar zu machen; ein „Kameratest“, und zwei interessante Videos aus verschiedenen Perspektiven.

Aufbau:

Wie schon beim vorigen Versuch wurde der Ballon mittels einer Schnur an einem Stativ befestigt; Kurz dahinter wurde ein Stück Karton aufgestellt, einerseits, um bessere Lichtverhältnisse zu schaffen, andererseits als Kugelfang. Haustiere und Menschen müssen natürlich vom Ziel Abstand halten.

Durchführung:

Das Luftdruckgewehr wird geladen, vor dem Schuss ist sicherzustellen, dass sich niemand in der Nähe des Zielobjektes aufhält. Dann wird gezielt und geschossen.

Beobachtung:

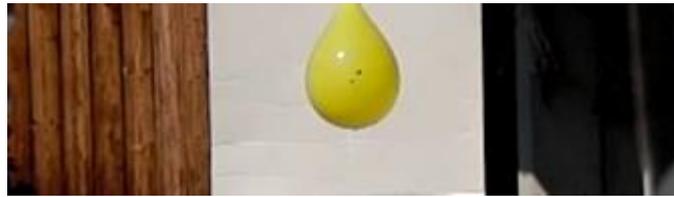


Abb. 43



Abb. 44



Abb. 45

Abb. 43 –45: Projektil einer Druckluftwaffe trifft auf einen mit Wasser gefüllten Ballon

Im ersten Video steht die Kamera normal auf die Flugrichtung des Projektils, welches dadurch in kurzer Zeit das Bild durchquert und nur sehr schwer zu sehen ist, etwa beim Austritt aus dem Ballon. Das Zusammenziehen der Ballonhülle geht so schnell, dass nicht festzustellen ist, ob das Projektil durch die Gummihülle austritt oder nur das Wasser durchqueren muss. Auch ist nur das austretende Projektil sichtbar, während der Zeit vor dem Eintritt sieht man es jedoch nicht.

Im zweiten Video wurde die Kamera gleich neben dem Gewehrlauf postiert und „verfolgt“ das Projektil auf seinem Weg von hinten. Durch diese Anordnung durchquert das Projektil während seiner Flugzeit keine so große Strecke normal zur Kameraausrichtung, was eine erheblich bessere Verfolgung seiner Flugbahn zulässt. Tatsächlich sehen wir das Projektil als schwarzen Punkt, sowie den Aufprall und das Platzen des Luftballons.

Die Physik:

Luftdruckprojekteile werden entweder durch eine unter Hochdruck stehende Gasladung (z.B. CO₂), oder durch eine „Druckluftpackung“, welche durch die Bewegung eines Kolbens bzw. die Spannung einer Feder erzeugt wird, beschleunigt. Dabei wird die unter Hochdruck stehende Kammer mittels eines Ventils in Richtung Lauf geöffnet, dadurch entweicht das unter Druck stehende Gas und treibt so das Projektil an.

Die Masse eines solchen Projektils beträgt 0,6 g, die maximale Austrittsenergie ist in Deutschland mit 7,5 Joule begrenzt, in Österreich gibt es keine solche Begrenzung.

Wir berechnen die Austrittsgeschwindigkeit für ein Projektil der Masse

$m = 0,6 \text{ g} = 0,0006 \text{ kg}$, welches mit einer Energie von $E_{kin} = 7,5 \text{ J}$ aus dem Lauf austritt.

Wir benötigen hierfür die allgemein gebräuchliche Formel für die kinetische Energie

$$E_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (3.25)$$

welche wir nach v umformen zu

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}} \quad (3.26)$$

Wir setzen die bekannten Werte für E_{kin} und m ein:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 7,5 \text{ J}}{0,0006 \text{ kg}}} = 158,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 569 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (3.27)$$

Diese Austrittsgeschwindigkeit ist recht hoch und wird gewiss nicht mit jeder Druckluftwaffe erreicht; auch soll der Wert von $E_{kin} = 7,5 \text{ J}$ ja eine Obergrenze für die Austrittsenergie darstellen.

Tropfen auf der heißen Herdplatte – der Leidenfrost-Effekt:

Aufbau:

Benötigt werden ein Elektroherd und ein Schwamm oder ein Stück eines anderen saugfähigen Materials zur Erzeugung von Wassertropfen durch Ausdrücken.

Durchführung:

Der Elektroherd wird eingeschaltet und auf höchste Heizleistung eingestellt. Nun wartet man einige Minuten, bis die Herdplatte recht heiß ist. Vorsicht: Keinen Hautkontakt mit der

Herdplatte zulassen, da sonst Verbrennungen drohen! Sobald die Herdplatte sich einige Minuten lang erwärmt hat, lässt man einige nicht zu große Wassertropfen auf die heiße Platte fallen.

Beobachtung:



Abb. 46: Tropfen auf heißer Herdplatte. Aufgrund des „Schwebezustandes“ kann der Tropfen in seiner Form recht lange schwingen, da keine Reibung Energie entzieht.

Wassertropfen, welche auf die heiße Herdplatte aufgebracht wurden, zerrinnen nicht auf der heißen Herdplatte, sondern bleiben ganz und vollführen „tanzende“ Bewegungen. Im High-Speed-Video bei 1200 fps kann man außerdem sehen, dass die Fragmente auftreffender und zerspringender Tropfen wie Gummibälle erscheinen, welche durch die Gegend hüpfen. Diese kleinen Tröpfchen bleiben offenbar nicht auf der Oberfläche stehen bzw. haften, wie dies bei einer kalten Herdplatte der Fall wäre. Warum ist das so?

Die Physik:

Das Phänomen der auf der heißen Platte umhertanzenden Wassertröpfchen wird Leidenfrost-Effekt genannt, nach Johann Gottlob Leidenfrost, einem deutschen Mediziner, Physiker und Theologen (im 18.Jhdt. war dies übrigens keine unübliche Kombination!), der dieses Phänomen erstmals beschrieb.

Der Effekt des tanzenden Tropfens stellt sich ein, wenn die Herdplatte so heiß ist, dass ein auffallender Wassertropfen nicht auf ihr zum Liegen kommt, sondern die jeweils untersten Molekülschichten des Tropfens aufgrund der Hitze vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen, also verdampfen. Dies bedingt, dass der Tropfen nicht direkt auf

der Platte liegt, sondern zu jedem Zeitpunkt von einem „Dampfpolster“ an seiner Unterseite schwebend gehalten wird (siehe Abb. 47). Durch die solcherart verminderte Reibung kann sich der Tropfen in der beobachteten Form bewegen.

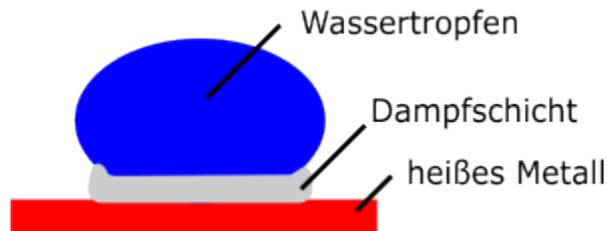


Abb. 47: Der Leidenfrost-Effekt (schematisch)

In der Technik wird diese Art der Reibungsminderung durch einen „Gaspolster“ beim Luftkissenboot angewandt, wo ein Gebläse einen ständigen Luftpolster unter dem Fahrzeug erzeugt.

Ein weiterer Effekt des Dampfpolsters ist die verringerte Wärmeübertragung. Der Tropfen liegt nicht direkt auf der Platte auf, somit wird die Wärme nicht direkt von Platte zu Wasser übertragen, sondern über den „Umweg“ der Dampfschicht, wodurch pro Zeiteinheit weniger Wärme als bei direkter Übertragung beim Tropfen ankommt. Dadurch verzögert sich die Verdampfung eines Tropfens, der bei direktem Kontakt innerhalb von wenigen Sekunden verdampft wäre, beträchtlich.

Der Leidenfrost-Effekt beschränkt sich nicht auf Wasser – auch bei Experimenten mit flüssigem Stickstoff oder geschmolzenen Metallen tritt er zutage. Im Alltag ist die Wasservariante natürlich die sparsamste, gesündeste und eindrucksvollste. Das Wasser benötigt zum Verdampfen recht viel Energie, deshalb kann der Effekt auch lange beobachtet werden.

Tanzender Ballon:

Aufbau:

Ein Luftballon wird mit Wasser gefüllt. Es ist darauf zu achten, den Ballon nicht zu voll werden zu lassen (weniger als bei den Versuchen zur Trägheit).

Durchführung:

Der Ballon wird aus ca. 1,50 m Höhe fallen gelassen.

Beobachtung:



Abb. 48: Ausschnitte aus dem High-Speed-Video „Tanzender Ballon“

Wir sehen, wie der Ballon zu Boden fällt. Dabei besitzt er eine runde Form. Sobald der Ballon auf dem Boden auftrifft, beginnt er sich zu verformen; das im Ballon befindliche Wasser wird gleichmäßig in jede Richtung zur Seite gedrückt, sodass der Ballon zu einem bestimmten Zeitpunkt in flacher Form mit einem Wulst am Rand erscheint. Daraufhin zieht sich der Ballon wieder zusammen und springt nach oben, wobei der in der Mitte liegende Teil des Ballons zuerst hochspringt. Nun „tanzt“ der Ballon bzw. das in ihm befindliche, in große Unruhe gebrachte Wasser, in der Luft.

Die Physik:

Eigentlich wollte ich eine platzende Wasserbombe filmen, dieses sehr schöne Video war also eigentlich ein „Unfall“.

Verantwortlich für die hier eintretenden Ereignisse sind:

- Die Erdanziehungskraft
- Die Trägheit des Wassers
- Die wirkenden Zugkräfte der gespannten Ballonhülle

Zunächst sehen wir das Auftreffen des Ballons, der dadurch ganz schön aus seiner vormals runden Form gerät. Die Hülle des Ballons ist elastisch, der wassergefüllte Ballon gut verformbar, deshalb wird das Wasser im Ballon gleichmäßig in jede Richtung vom Ballonmittelpunkt weggedrückt. Warum dies so ist, sehen wir in den ersten drei Bildern der oben gezeigten Fotosequenz: Der Ballon trifft auf die Erde und wird rapide abgebremst, der

untere Teil des Ballons berührt schon den Boden, während der obere noch immer in Bewegung in Richtung Boden ist. Das Wasser im unteren Teil des Ballons muss nun ausweichen, da das von oben kommende Wasser Platz benötigt, den die ursprüngliche auftreffende Fläche des Ballons nicht bieten kann. So bewegt sich also das Wasser zur Seite und dehnt so die Ballonhülle. Der Ballon ist, wie erwähnt, elastisch. So wird beim Bremsvorgang des Ballons Energie umgewandelt. Die kinetische Energie des gefüllten Ballons verringert sich durch den Abbremsvorgang, jedoch ist sie nicht verloren, sondern wird in anderer Form sichtbar: der gedehnten Ballonhülle. Zum Dehnen der Hülle muss nämlich Arbeit verrichtet bzw. Energie aufgewandt werden. Die Dehnung der Hülle ist zu dem Zeitpunkt maximal, zu dem sich beinahe das ganze Wasser im Wulst rund um den Mittelpunkt der Grundfläche des Ballons befindet, wie im fünften Bild der Bildserie (dem ersten Bild in der zweiten Zeile) zu sehen ist. Nun besitzt die gedehnte Ballonhülle eine gewisse potentielle Energie; durch Entspannung der Hülle kann Arbeit verrichtet werden. Diese Arbeit wird verrichtet, wenn sich der Ballon wieder zusammenzieht bzw. entspannt und das Wasser wieder nach innen gedrückt wird. Dieses Nach-Innen-Drücken des Wassers bedingt auch den wurstförmigen Wasserkegel, der in der Mitte der Ballonfläche beim Zusammenziehen nach oben wächst.

3.3 Feuer und Explosionen

„Löschen“ eines Fettbrandes:

Versuchsaufbau:

Auf einem Stativ wird eine Metallplatte oder ein Gitter waagrecht angebracht. Darauf stellt man ein Teelicht, aus dem ein Großteil des Waxes entfernt wurde, sodass sich nur noch ca. 1/8 der ursprünglichen Wachsmenge im Teelichtbehältnis befindet. Mit einem Bunsenbrenner erhitzt man die Platte, bis das Wachs im Teelicht schmilzt, zu kochen und schließlich zu brennen beginnt.

Durchführung:

Mit einer Wasserflasche mit Spritzvorrichtung spritzt man in das brennende Wachs. Vorsicht – es kommt zu einer Explosion.

Beobachtung:



Abb. 49: Ausschnitt aus dem Go-Pro-Echtzeitvideo „Löschen eines Fettbrandes“



Abb. 50: Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Löschen eines Fettbrandes“

Sobald das Wasser auf das brennende Wachs trifft, passiert eine Explosion. Im Echtzeit-Video sieht man eine Stichflamme von ansehnlicher Größe; in der 20-fachen Zeitlupe (600 fps) sieht man genau, wie kleine, brennende Wachströpfchen durch die Luft fliegen und dabei Rauchspuren erzeugen. Gleichzeitig bildet sich eine pilzförmige Stichflamme aus.

Die Physik:

Um diesen Versuch zu verstehen, brauchen wir auch ein wenig Chemie. Zunächst überlegen wir uns, warum Wachs überhaupt brennt. Dann werden wir uns der im Video beobachteten Explosion zuwenden.

Wachs beginnt von selbst zu brennen, sobald es ungefähr 300°C heiß ist.

Dies passiert aufgrund einer Verkettung von Vorgängen unter Hitzezufuhr:

1. das Schmelzen des Waxes
2. Transport des Brennstoffes durch die Kapillarität des Doctes
3. die Verdampfung des Waxes bei weiterer Hitzezufuhr
4. die thermische Aufspaltung der Moleküle des gasförmigen Waxes (Pyrolyse) → es entstehen gasförmige Kohlenwasserstoffe, Radikale (hochreaktive Kohlenwasserstofffragmente) und fester Kohlenstoff
5. Oxidation der Pyrolyseprodukte

Die Reaktion der Pyrolyseprodukte mit dem Sauerstoff der Luft bedingen nach dem Erreichen der Zündtemperatur den Start des eigentlichen Brennens, welches nun selbsterhaltend funktioniert – die Brenntemperatur wird durch den Brennvorgang erhalten [9].

Vereinfacht lässt sich der Brennprozess folgendermaßen darstellen:



Der erste Term in dieser Reaktion steht für das verbrennende Wachs. Auf molekularer Ebene bildet sich Wachs aus sogenannten Kohlenwasserstoffketten. Dies sind sehr „große“ Moleküle, was die hohe Zahl an Kohlenstoffatomen (20) und Wasserstoffatomen (42) pro Molekül erklärt. Der zweite Term in der Reaktionsgleichung steht für den Sauerstoff, der zur Reaktion benötigt wird; dieser wird aus der Umgebungsluft geholt. Wie man sieht, entstehen bei der Reaktion CO_2 , also Kohlendioxid und Wasserdampf. Beides sind Treibgase, welche bei vielen Brennprozessen im Alltag (kalorische Kraftwerke, Verbrennungsmotoren usw.) entstehen. Treibgase transmittieren kurzwellige Strahlung (Sonnenlicht), jedoch wird Wärmestrahlung, die von unserer von der Sonne aufgeheizten Erde abgestrahlt wird, NICHT durchgelassen, sondern zu einem großen Teil Richtung Erde zurückgestreut – dies erklärt, wie der Mensch als Treibgasproduzent ins Klimageschehen eingreifen kann.

Die obenstehende Reaktionsgleichung ist nicht als vollständig anzusehen – sie gibt lediglich die Anfangs- und Endzustand des Verbrennungsprozesses wieder. Tatsächlich läuft dieser nämlich über mehrere Teilreaktionen (über 60) ab, eine noch weitaus größere Zahl von Reaktionen wird vermutet. [10]

Nun wissen wir also über das Brennen von Wachs Bescheid – was passiert aber nun beim „Löschen“ der Wachsflamme mit Wasser?

Im Video sieht man, wie erwähnt, eine Stichflamme, dazu auch eine hohe Zahl an brennenden Wachströpfchen, die, gefolgt von einer Rauchspur, in die Luft schießen und dann zu Boden fallen. Diese Tröpfchen geben Aufschluss über das Geschehene.

Wachs siedet und verdampft bei einer Temperatur von ca. 250°C , Wasser schon bei 100°C . Treffen nun einige Wassertropfen in das Teelicht, so verdampft das Wasser aufgrund der Temperatur von weit über 100°C schlagartig. Der aufsteigende Wasserdampf reißt Wachströpfchen mit, diese entzünden sich aufgrund der herrschenden Hitze und des ausreichend verfügbaren Sauerstoffs und erzeugen so die Stichflamme und die erwähnten Rauchspuren.

Wiederzünden der Kerze:

Aufbau:

Eine Kerze wird auf einem Stativ platziert und angezündet. Zum Ablöschen der Flamme sollte ein Glas bzw. ein Trichter, wie er in der Kirche verwendet wird, bereit sein. Keinesfalls sollte man die Kerze ausblasen, da sonst der entstehende Rauch zu sehr verwirbelt wird und das Experiment dann nicht funktioniert. Ein Feuerzeug liegt griffbereit zum Wiederzünden.

Durchführung:

Die Kerze wird mit einem Glas ausgelöscht, sobald die Flamme nicht mehr zu sehen ist, zieht man das Glas schnell, aber nicht zu hastig, weg. Der vom Docht geradlinig aufsteigende Rauch kann nun in ca. 15 cm Höhe über der Kerze mit dem Feuerzeug entzündet werden. Dies sollte so rasch wie möglich nach dem Ablöschen der Kerze passieren.

Beobachtung:

Die folgende Bildreihe (Abb. 51 – Abb. 57) zeigt den Vorgang des Wiederzündens der Kerze. Bei den Bildern handelt es sich um Ausschnitte aus dem High-Speed-Video „Wiederzünden der Kerze“.



Abb. 51



Abb. 52



Abb. 53



Abb. 54



Abb. 55



Abb. 56



Abb. 57

Sobald die Kerze abgelöscht ist, entsteht ein „Rauchkanal“ aus vom Docht aufsteigendem Rauch. Die Zündung dieses Rauchkanals in einigen cm Höhe über der Kerze setzt den Rauch in Brand. Ein kleines Flämmchen wandert von der Höhe des Feuerzeugs nach unten zum Docht und entzündet diesen neu.

Die Physik:

Wie schon bei anderen Versuchen mit Kerzen werden wir auch hier ein wenig Chemie einbringen, um zu verstehen, warum sich die Kerze „aus der Luft“ zünden lässt.

Zunächst wird die Kerze abgelöscht; dies geschieht, indem wir ein Glas überstülpen; die Kerzenflamme benötigt, um sich aufrecht zu erhalten, Sauerstoff. Die entsprechende Reaktionsgleichung wurde im vorigen Versuch „Löschen eines Fettbrandes“ gezeigt. Das übergestülpte Glas verhindert jedoch, dass Sauerstoff zur Kerze nachfließen kann; sie erlischt, sobald der im Glas befindliche Sauerstoff verbraucht ist.

Zieht man nun das Glas vorsichtig weg, so steigt, ausgehend vom Docht der Kerze, weißer Dampf auf, welcher leicht entzündlich ist. Woher kommt dieser Dampf, warum ist er noch da, nachdem die Kerze gelöscht wurde, und warum ist er brennbar?

Zunächst wird untersucht, woher der Docht eigentlich das Wachs bezieht:

Während des ganzen Brennvorgangs einer Kerze wird über den Docht Wachs „nachgeliefert“, und zwar mittels des Kapillareffektes:

In einer dünnen Röhre (und die feinen Fasern eines Dochts bilden für das Wachs viele dünne Röhren) steigen die meisten Flüssigkeiten trotz der Gravitationskraft, welche in die entgegengesetzte Richtung wirkt, ein kleines Stück nach oben. Dies ist auf das Zusammenwirken verschiedener Kräfte zurückzuführen. Die eine ist die Kohäsionskraft (dies ist die Kraft, die die Moleküle eines Stoffes zusammenhält, wie im Versuch „Wassertropfen“ beschrieben), die andere die Adhäsionskraft. Diese beschreibt die Wechselwirkung der Moleküle zweier verschiedener Stoffe (in diesem Fall der Wände der Röhre und des Wachses), bzw. ihr Bestreben, miteinander in Kontakt zu stehen, z.B. aufgrund elektrostatischer Effekte. Für den Fall, dass die Wirkung der Adhäsion überwiegt, steigt die Flüssigkeit an den Berührungsflächen hoch, und zwar so lange, bis sich die Gewichtskraft der Flüssigkeit \vec{F}_g in der Röhre und die Kapillarkraft \vec{F}_K die Waage halten.

$$\vec{F}_g = m_F \cdot g = 2 \cdot r \cdot \pi \cdot \sigma = \vec{F}_K \quad (3.29)$$

Hierbei steht $2 \cdot r \cdot \pi$ für den inneren Umfang der Röhre, also der Länge, auf der die Flüssigkeit mit der Röhre in Kontakt steht. σ steht für die Oberflächenspannung, welche beim Versuch „Wassertropfen“ genauer erklärt wird. So also gelangt das Wachs im Docht nach „oben“.

Wird nun die Kerzenflamme abgelöscht, so brennt sie zwar nicht mehr, im Docht bleibt es jedoch einige Zeit noch recht warm – warm genug, um weiterhin Wachs zu verdampfen,

welches dann aufsteigt, in der Luft abkühlt und den weißlichen Rauch bildet, der im Video zu sehen ist. Entzünden wir diesen Rauch einige cm über der Kerze, so können wir die Reaktion, welche im Versuch „Löschen eines Fettbrandes“ dargestellt ist, wieder in Gang bringen. Die Flamme wandert dabei in jene Richtung, aus der ihr Brennmaterial kommt – bis zum Docht, wo die Kerze wieder zu brennen beginnt.

Staubexplosion:

Aufbau:

Eine Kerze wird auf einem Stativ platziert und angezündet. Griffbereit sind ein Blasrohr bzw. ein Strohhalm und eine kleine Menge Lycopodiumpulver.

Durchführung:

In das Blasrohr nehmen wir eine kleine Menge Lycopodiumpulver auf und blasen dieses in die Flamme. Es wird empfohlen, beim ersten Versuchsdurchlauf nur wenig Lycopodium zu verwenden und die Menge dann zu steigern, da die auftretende Stichflamme in ihrer Größe nur schwer abzuschätzen ist.

Beobachtung:



Abb. 58: Staubexplosion, Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Staubexplosion“

Das in die Flamme geblasene Pulver entzündet sich explosionsartig, eine Stichflamme breitet sich in Blasrichtung aus.

Die Physik:

Im Versuch wurde ein besonders feines Pulver verwendet, nämlich die Samen des Bärlapps, welche in der Pharmazie Anwendung bei der Herstellung von Tabletten finden. Dieses Pulver eignet sich aufgrund seiner Feinheit besonders gut zur Demonstration einer Staubexplosion.

Doch warum sind gerade feine Pulver so geeignet?

Die Verbrennung von Stoffen an der Luft funktioniert, wie bereits erwähnt, durch chemische Reaktionen zwischen den Molekülen des zu verbrennenden Stoffes und der Sauerstoffatome in der Luft. Damit möglichst viele Moleküle des Brennstoffes mit Luft in Verbindung stehen und schneller reagieren, benötigt man eine möglichst große Brennstoffoberfläche. Man kann sich das Ganze anhand eines Gedankenexperiments vorstellen: entzündet man ein Holzsplit, so benötigt dieses eine gewisse Zeit, um zu verbrennen. Zerkleinert man ein gleich großes Holzsplit in viele sehr kleine Stücke, und entzündet diese, so wird die Brenndauer viel kürzer sein als beim Holzsplit, welches als Ganzes verbrannt wurde, obwohl das Gewicht der beiden Holzsplitte gleich war. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die zerkleinerten Holzstücke dem Sauerstoff mehr Oberfläche zur Reaktion boten und der Brennvorgang so schneller vonstattenging. Insgesamt wurde bei den beiden Brennvorgängen genau gleich viel thermische Energie frei; Beim ganzen Holzsplit wurde weniger thermische Energie / Zeit frei, dafür aber über einen längeren Zeitraum, bei den zerkleinerten Stücken wurde mehr thermische Energie / Zeit frei, dafür aber über einen viel kürzeren Zeitraum. (Der Ausdruck „Energie / Zeit“ wird in der Physik als „Leistung“ bezeichnet, ihre Einheit trägt einen wohlbekannten Namen: Watt [W])

Nun kann man sich vorstellen, dass die Verbrennung noch schneller vonstattengeht, wenn das Brennmaterial noch viel feiner ist, als es zerkleinerte Holzstücke sind. Dies ist beim Bärlapp-Samen der Fall. Verbrennt man eine bestimmte Menge dieses Samens, so wird innerhalb sehr kurzer Zeit eine sehr große Menge an Energie frei. Und da sind wir schon recht nah bei der gängigen Definition einer Explosion: „Viel Energie wird in kurzer Zeit frei“.

Aber wie entsteht eigentlich dieser Feuerball, der ein viel größeres Volumen einnimmt, als die Bärlapp-Samen, welche in die Flamme geblasen wurden?

Die Verbrennung als chemische Reaktion bedingt ja eine „Vergasung“ des Brennstoffes. Plötzlich werden Teile eines festen Stoffes gasförmig, und noch dazu heiß! Weil heiße Gase sich rasch ausdehnen, nimmt die Explosion ihre Form an. Heißes Gas dehnt sich aus, es „expandiert“, und reißt dabei weitere Staubpartikel mit, die sich aufgrund der großen Hitze wiederum entzünden, was weiteres Gas entstehen lässt.

Implosion eines Fernsehers:

Aufbau:

Ein möglichst großer Röhrenfernseher (!) wird gut auf einer Auflage fixiert. Im vorliegenden Fall geschah dies mittels einer auf der Auflage festgeschraubten Latte, welche den Fernseher am Verrutschen hindern sollte. Auch die Auflage soll nicht beweglich am Boden fixiert sein – anders als im Video zu sehen.

Eine schwere Eisenkugel wird an der Hörsaaldecke (bzw. einer geeignet hohen Decke) an einer Kette befestigt und ausgelenkt.

Vorsicht: für diesen nicht ungefährlichen Versuch sind einige Sicherheitsmaßnahmen notwendig:

- Der Fernseher muss auf einer rutschfesten Unterlage platziert werden.
- Das Publikum muss vor herumfliegenden Glasscherben aus der Frontscheibe geschützt werden.
- Bei der Implosion kommt es zu einem lauten Knall – die Verwendung eines Gehörschutzes wird angeraten.
- Das Experiment sollte nur im Freien oder in sehr großen Räumen (Hörsaal) durchgeführt werden.

Durchführung:

Die ausgelenkte Eisenkugel wird losgelassen, sodass sie genau mittig in die Scheibe des Fernsehers schwingt.

Der anfallende Müll (Glasscherben, Plastikteile) ist gründlich wegzuräumen.

Beobachtung:



Abb. 59: Eisenkugel trifft auf Fernseher

Die Eisenkugel trifft auf die Bildschirme des Fernsehers. Das Glas zerspringt, das Gehäuse des Fernsehers wird nach vorne (in jene Richtung, aus der die Kugel gekommen ist) geworfen und zerspringt in seine Einzelteile. Es ist gut zu erkennen, dass die Scherben beim Aufprall zunächst ins *Innere* des Fernsehers gezogen werden. Der Fernseher zerspringt dann in viele Einzelteile.

Die Physik:

Dieser Versuch dient der Veranschaulichung einer Implosion, eines Vorgangs, bei dem ein System aufgrund höheren Außendrucks kollabiert. Doch warum funktioniert dies bei einem Röhrenfernseher?

Hierzu betrachten wir das Innenleben eines solchen Geräts.

Röhrenfernseher funktionieren nach dem folgenden Prinzip, welches hier vereinfacht dargestellt wird:

Elektronen werden in einer Glasröhre von einer Glühkathode emittiert und über eine Anode zu einer optisch beschichteten Scheibe beschleunigt. Hierbei werden die einzelnen Elektronen von einem Steuersystem, welches aus stromdurchflossenen Spulen besteht, magnetisch abgelenkt, damit sie auf den ihnen bestimmten Ort treffen, dort die fluoreszierende Schicht anregen und zum Leuchten bringen. Auf dem Weg dorthin durchlaufen sie auch andere Steuerinstanzen; so kann der Elektronenstrahl durch eine weitere Steuereinheit (Wehneltzylinder) mit Hilfe einer Gegenspannung, welche die Elektronen bremst, in seiner Intensität beeinflusst werden, was sich am Bildschirm durch dunklere (niedrige Intensität) bzw. hellere (höhere Intensität) äußert.

Doch wo ist hier das System, welches aufgrund seines geringen Innendrucks kollabieren soll? Damit die Elektronen ungehindert von der Kathode zur Mattscheibe wandern können, ohne sich an anderen Atomen zu stoßen, ist es notwendig, ihnen einen evakuierten Bereich, in dem sich möglichst keine weiteren Atome befinden, zu schaffen. Dies wird durch eine Vakuumröhre erreicht, welche das Herzstück eines jeden Röhrenfernsehers darstellt.

In einer solchen Vakuumröhre befindet sich (wie man sich vielleicht schon denken kann) ein Vakuum, also ein Bereich, in dem der Gasdruck bei weitem geringer ist als in unserer Atmosphäre. Dies wird erreicht, indem man diesen Bereich evakuiert, also möglichst alle dort befindlichen Atome abgepumpt werden. Zerstört man nun, wie im Video, die diesen evakuierten Bereich umgebende Hülle (die Glasummantelung der Röhre), so werden schlagartig Teilchen ins Innere „gedrückt“, eine Folge des Druckgefälles bzw. -ausgleichs. Dies ist der Start der Implosion, wie wir sie im Video gesehen haben: Der rapide Druckausgleich bewirkt, dass gemeinsam mit der Luft die Trümmer der von der Kugel zerstörten Glasscheibe nach innen gezogen werden! Gleichzeitig wird das ganze Gehäuse einige cm nach vorne, also in die Richtung, aus der die Eisenkugel kam, getragen. Dieser Umstand lässt sich dadurch erklären, dass die aufschlagende Eisenkugel den Fernseher gegen die auf der Auflage fixierte Latte schleudert und der Fernseher an der Latte „reflektiert“ wird. Dies stellt einen besonderen Fall der Impulserhaltung dar: den Stoß an einer unbeweglichen Barriere.

Zunächst werden wir die Geschwindigkeiten beim elastischen Stoß mathematisch herleiten, später diesen erwähnten Spezialfall berücksichtigen. Hierzu werden sämtliche Parameter, welche den Index „1“ besitzen, als „vor dem Stoß“, sämtliche Parameter, welche den Index „2“ besitzen, als „nach dem Stoß“ angesehen. Der Index „F“ bezeichnet eine den Fernseher betreffende Größe, der Index „L“ die Latte.

Für ein System zweier stoßender Körper gilt

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 \quad (3.30)$$

mit \vec{p}_1 als Gesamtimpuls des Systems vor dem Stoß und \vec{p}_2 als Gesamtimpuls nach dem Stoß. Der Gesamtimpuls des Systems vor und nach dem Stoß muss also gleich bleiben:

$$m_F \cdot \vec{v}_{F1} + m_L \cdot \vec{v}_{L1} = m_F \cdot \vec{v}_{F2} + m_L \cdot \vec{v}_{L2} \quad (3.31)$$

Wir stellen nach den beiden Massen um zu:

$$m_F \cdot (\vec{v}_{F1} - \vec{v}_{F2}) = m_L \cdot (\vec{v}_{L2} - \vec{v}_{L1}) \quad (3.32)$$

Auch gilt die Energieerhaltung:

$$\frac{m_F \cdot \vec{v}_{F1}^2}{2} + \frac{m_L \cdot \vec{v}_{L1}^2}{2} = \frac{m_F \cdot \vec{v}_{F2}^2}{2} + \frac{m_L \cdot \vec{v}_{L2}^2}{2} \quad (3.33)$$

Wir eliminieren die Brüche durch Multiplikation mit 2 und stellen nach den beiden stoßenden Massen um:

$$m_F \cdot (\vec{v}_{F1}^2 - \vec{v}_{F2}^2) = m_L \cdot (\vec{v}_{L2}^2 - \vec{v}_{L1}^2) \quad (3.34)$$

Unter Einbeziehung binomischer Zusammenhänge können wir dies wie folgt schreiben:

$$m_F \cdot (\vec{v}_{F1} - \vec{v}_{F2}) \cdot (\vec{v}_{F1} + \vec{v}_{F2}) = m_L \cdot (\vec{v}_{L2} - \vec{v}_{L1}) \cdot (\vec{v}_{L2} + \vec{v}_{L1}) \quad (3.35)$$

Die Ausdrücke aus 3.32 können wir nun einsetzen zu:

$$m_L \cdot (\vec{v}_{L2} - \vec{v}_{L1}) \cdot (\vec{v}_{F1} + \vec{v}_{F2}) = m_L \cdot (\vec{v}_{L2} - \vec{v}_{L1}) \cdot (\vec{v}_{L2} + \vec{v}_{L1}) \quad (3.36)$$

Dies können wir kürzen zu:

$$(\vec{v}_{F1} + \vec{v}_{F2}) = (\vec{v}_{L2} + \vec{v}_{L1}) \quad (3.37)$$

Somit erhalten wir für die Geschwindigkeiten der Körper nach dem Stoß:

$$\vec{v}_{F2} = \vec{v}_{L2} + \vec{v}_{L1} - \vec{v}_{F1} \quad (3.38)$$

und

$$\vec{v}_{L2} = \vec{v}_{F1} + \vec{v}_{F2} - \vec{v}_{L1} \quad (3.39)$$

Diese Terme setzen wir in 3.32 ein zu:

$$m_F \cdot (\vec{v}_{F1} - \vec{v}_{L2} - \vec{v}_{L1} + \vec{v}_{F1}) = m_L \cdot (\vec{v}_{L2} - \vec{v}_{L1}) \quad (3.40)$$

bzw.

$$m_F \cdot (\vec{v}_{F1} - \vec{v}_{F2}) = m_L \cdot (\vec{v}_{F1} + \vec{v}_{F2} - \vec{v}_{L1} - \vec{v}_{L1}) \quad (3.41)$$

Diese beiden Ausdrücke können wir nun nach \vec{v}_{F2} bzw. \vec{v}_{L2} umformen und erhalten dann für die Geschwindigkeiten der Körper nach dem Stoß

$$\vec{v}_{F2} = \frac{2m_L \vec{v}_{L1} + m_F \vec{v}_{F1} - m_L \vec{v}_{F1}}{m_L + m_F} \quad (3.42)$$

und

$$v_{L2} = \frac{2m_F \vec{v}_{F1} + m_L \vec{v}_{L1} - m_F \vec{v}_{L1}}{m_L + m_F} \quad (3.43)$$

In unserem Fall ist die Latte auf der Auflage fixiert, sodass sie völlig unbeweglich ist. Deshalb können wir für m_L die Erdmasse einsetzen. Für diesen Sonderfall

$$m_L \gg m_F$$

und

$$\vec{v}_L = 0$$

ergibt sich

$$\vec{v}_{F2} = -\vec{v}_{F1}. \quad (3.45)$$

und

$$\vec{v}_{L2} \approx 0. \quad (3.46)$$

Die Impulsänderung des Fernsehers ist somit

$$\Delta p_F = p_{F1} - p_{F2} = p_{F1} - (-p_{F1}) = 2p_{F1} \quad (3.47)$$

Der von der unbeweglichen Latte zurückprallende Körper besitzt also nach dem Stoß die gleiche Geschwindigkeit wie vor dem Stoß, jedoch zeigt der Geschwindigkeitsvektor nun in die entgegengesetzte Richtung. Dabei ist der Betrag der Änderung des Impulses doppelt so groß wie der Impuls des Fernsehers vor oder nach dem Stoß.

Vakuumpipen befinden sich nicht nur in Röhrenfernsehern, sondern finden bzw. fanden in vielfältiger Weise Anwendung. So sind sie in ihrer Funktion der Vorläufer der Diode und wurden zum Beispiel häufig zum Gleichrichten von Wechselstrom verwendet. Ältere Verstärkerschaltungen funktionieren mit Vakuumpipen, und Hi-Fi-Puristen wie Gitarristen schwören auf Vakuumpipen in ihren Verstärkern, tatsächlich hören erfahrene Gitarristen, welcher Röhrentyp in der Endstufe eines Verstärkers verbaut ist.

Explosionen - Wasserstoff vs. Methan:

Aufbau:

Zwei große Luftballons werden gefüllt; einer mit reinem Wasserstoffgas (H₂), der andere mit Methangas (CH₄). Die Ballons werden an jeweils an einer ca. 2,5 m langen Schnur befestigt und losgelassen, woraufhin sie aufstiegen. Eine lange Eisenstange mit am Ende befestigter Stativklemme liegt bereit, in die Stativklemme wird ein Bunsenbrenner eingespannt.

Durchführung:

Der Bunsenbrenner wird in Gang gesetzt; nun hält man den Bunsenbrenner nacheinander an die beiden Ballons, beide explodieren.

Beobachtung:



Abb. 60: Explosion eines Wasserstoffballons



Abb. 61: Explosion eines Methanballons

Mit freiem Auge erkennt man keinen großen Unterschied zwischen den beiden Explosionen; bei einer Zeitauflösung von 600 fps erkennt man, dass ganz eindeutige Unterschiede vorliegen. So zündet der Wasserstoffballon viel schneller als der Methanballon; die Explosion ist kürzer und heftiger. Die Gründe hierfür werden im Folgenden erläutert.

Die Physik:

Nähert man sich mit dem Bunsenbrenner der Hülle eines Ballons, so brennt man ein Loch in diese, und der Ballon platzt. Ob der Ballon hierbei mit Atemluft, Methan oder Wasserstoff gefüllt ist, spielt keine Rolle. Nun passieren im vorliegenden Fall zwei Explosionen: beim Wasserstoffballon recht schnell und mit einem lauten Knall, beim Methanballon, wie wir in der Zeitlupe gesehen haben, langsamer als die erste und mit einem eher dumpfen Knall.

Warum dies?

Zunächst betrachten wir die Explosion des Wasserstoff-Ballons:

Das Platzen des Ballons erfolgt wie erwähnt, wenn die Ballonhülle durch die Hitzeeinwirkung beschädigt wird und aufreißt. Sobald der Ballon geplatzt ist, durchmischt sich der Wasserstoff mit dem Sauerstoff der Umgebungsluft, es entsteht ein sehr leicht brennbares Gas, das Knallgas. Die noch immer brennende Flamme des Bunsenbrenners liefert die Energie für die nun folgende, rasch ablaufende Reaktion:



Aus der Reaktion eines Wasserstoffmoleküls H_2 und eines Sauerstoffmoleküls O_2 unter Energiezufuhr (Brennerflamme) entsteht ein H_2O -Molekül, also Wasser. Außerdem wird thermische Energie frei, die von anderen Molekülen wieder als „Reaktionsstarthilfe“ genutzt wird. Dieser Vorgang wiederholt sich in einer Art Kettenreaktion. Die viele freiwerdende thermische Energie bewirkt, dass sich die Reaktion explosionsartig durch das ganze Gemisch fortsetzt. Durch die entstandene Hitze expandieren die verwendeten Gase stark, es kommt zu einer Druckwelle. All dies geschieht in sehr kurzer Zeit, viel schneller als beim Methanballon, den wir uns nun näher ansehen werden.

Vermischt man Raumluft mit Methan und zündet das entstehende Gemisch, so passiert die folgende Reaktion:



Die Verbrennungsprodukte sind ein Kohlendioxid- (CO_2 -) Molekül und zwei Wasser- (H_2O)-Moleküle, sowie bei der Reaktion freiwerdende thermische Energie.

Doch warum geht die Reaktion des Wasserstoffs so viel schneller vonstatten als die des Methans? Warum gibt es beim Wasserstoff eine regelrechte Explosion, während das Methan vergleichsweise langsam verbrennt?

Die Reaktionsgleichungen der beiden Reaktionen zeigen, dass der Wasserstoff mit einem Sauerstoffmolekül reagiert, das Methan benötigt zwei Sauerstoffmoleküle zur Reaktion. Nun liegt es nahe, zu behaupten, dass das Methan einfach länger braucht, weil es mehr Sauerstoff aus der Umgebung benötigt, was erst durch gute, längerdauernde Durchmischung erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang werden wir den Begriff der „Explosionsgrenzen“ untersuchen. Die Explosionsgrenzen definieren jenen Mischbereich, in dem ein Gemisch aus

Gas und normaler Luft brennbar bzw. explosiv ist. Liegt der Anteil eines Gases an der Luft unter der unteren Explosionsgrenze oder oberhalb der oberen Explosionsgrenze, so ist das Gemisch nicht explosiv.

Im Luftballon eingeschlossen haben wir eine Methan- bzw. Wasserstoffkonzentration von 100%, es befindet sich also keine Atmosphärenluft im Ballon sondern die Gase in Reinform. Ein Wasserstoff-Luft-Gemisch ist bei einem Wasserstoffvolumensanteil von 4 – 75 % brennbar, ein Methan-Luft-Gemisch bei einem Methanvolumensanteil von 4 – 16 %. Das Methan muss sich also zur Erzeugung eines brennbaren Gemischs bei weitem stärker in der Luft verdünnen als der Wasserstoff, dessen Reaktion daher auch schneller beginnen kann.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Größe der Moleküle der reagierenden Stoffe; so sind Wasserstoffmoleküle recht klein und durchmischen daher leichter mit anderen Gasen als die vergleichsweise großen Methanmoleküle.

Die Durchmischung von Gasen und Flüssigkeiten ist ein physikalisch interessanter Vorgang, der Diffusion genannt wird. Im vorliegenden Fall haben wir die Diffusion durch die Vermischung der Gase aus den Ballonen mit der Umgebungsluft kennengelernt.

Wie kommt es eigentlich zu einer Diffusion?

Zunächst existieren räumlich getrennte Konzentrationen zweier verschiedener Gase oder Flüssigkeiten innerhalb eines bestimmten Volumens. Aufgrund der temperaturabhängigen Molekularbewegung (Brownsche Bewegung) vermischen diese miteinander. Dabei folgt die Diffusion bestimmten Gesetzmäßigkeiten – so bewegen sich die einzelnen Teilchen zwar in komplett zufällige Richtungen, die sich noch dazu durch Zusammenstöße mit anderen Teilchen andauernd ändern, trotzdem streben die Teilchen der beiden Stoffe, gemittelt über die Summe der Bewegungen, in Richtung der jeweils niedrigeren Konzentration (Konzentrationsgefälle), wodurch sich mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand einstellt. Vereinfacht gesagt: die Moleküle des Wasserstoffs bzw. des Methans bewegen sich eher dorthin, wo noch keine anderen Moleküle ihrer Art vorhanden sind, und zwar so lange, bis die Gasteilchen beider Gase gut durchmischt und gleichmäßig verteilt sind. Theoretisch wird der Gleichgewichtszustand erst nach unendlich langer Zeit erreicht; in der Praxis kommt es jedoch schon nach endlicher Zeit zu einer Durchmischung, die unter Zuhilfenahme der uns bekannten Messmethoden als Gleichgewichtszustand gesehen wird.

Wie schnell diese Durchmischung passiert, hängt besonders von der Temperatur ab. Wie oben erwähnt, ist die Brown'sche Bewegung temperaturabhängig; je wärmer es ist, desto stärker die Bewegung. Daher begünstigt eine höhere Temperatur auch eine schnellere Durchmischung.

Zu den verwendeten Gasen:

Wasserstoff ist das erste (Ordnungszahl 1) und leichteste Element im Periodensystem. Wasserstoffatome wurden aufgrund ihrer Einfachheit (1 Proton, 1 Elektron) als erstes auf ihre Beschaffenheit untersucht. Aufgrund der geringen Größe von Wasserstoffatomen und -molekülen (H_2) durchdringt Wasserstoff leicht Schichten von anderen Materialien und ist daher recht flüchtig und schwer „festzuhalten“. Energietechnisch ist Wasserstoff einerseits wegen des großen Energiegewinns aus der Reaktion mit Sauerstoff interessant (Brennstoffzelle), andererseits wegen der Möglichkeit der Kernfusion unter Verwendung von Wasserstoffatomen. Bis jetzt ist es allerdings noch nicht gelungen, einen funktionierenden, energietechnisch verwertbaren Fusionsreaktor zu bauen.

Methan (CH_4) ist ein in der Natur recht häufig vorkommendes Gas; ein wesentlicher Teil des geförderten Erdgases besteht aus Methan. In den letzten Jahren hat es wegen des von ihm mitverursachten Treibhauseffektes einige Bekanntheit erlangt. Es kommt in der Natur als Faulprodukt (z.B. in verrottender Sumpferde oder als chemisches Produkt der Faulprozesse in Kläranlagen) vor; in Permafrostböden gibt es recht häufig größere Methanblasen, welche durch die temperaturbedingte Aufweichung des Bodens entfliehen können und so den Treibhauseffekt weiter verstärken. Weiters kommt Methan zum Beispiel als Beiprodukt der Verdauung vor – so berichtete der ORF vor einigen Monaten (Stand 2014) von einem Kuhstall, der infolge der großen „Methanproduktion“ der Kühe Feuer fing. Auch wird Methan in großem Umfang bei der Erzeugung von thermischer bzw. elektrischer Energie aus Biomasse verwendet.

3.4 High Speed in der Natur

Die Spritzgurke (*Ecballium elaterium*) verteilt ihre Samen:

Die Spritzgurke stammt aus der Familie der Kürbisgewächse und kommt in Südeuropa (Kanaren, Mittelmeerraum, Balkan) vor. Sie wächst bevorzugt an öden Stellen bzw. an Wegrändern, ich habe das gefilmte Exemplar in Kroatien an einer Schutthalde, welche in einen Brackwassersumpf abfällt, gefunden. Die Spritzgurke ist, oral verabreicht, in allen Pflanzenteilen stark giftig und führt zu schwerem Durchfall, Erbrechen, Koliken und ähnlichem. In geringen Dosen wurde ihr Gift früher als stark wirkendes Abführmittel verwendet.

Die Früchte der Spritzgurke sind ca. 5 - 10 cm lang, ein bisschen stachlig und bemerkenswerterweise steinhart. Sobald sie reif sind, braucht man sie nur leicht zu berühren, um den Samenschleudermechanismus auszulösen, der im Folgenden genauer erklärt wird.

Beobachtung:



Abb. 62: Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Spritzgurke“

Die „Explosion“ der Spritzgurke in Echtzeit zu betrachten, ist nicht einfach – die Samen und die im Inneren befindliche Flüssigkeit werden so schnell ausgestoßen, dass dies mit dem freien Auge sehr schwer wahrzunehmen ist. Man nimmt zwar einen Knall wahr, spürt herumfliegende Gurkensamen und Wassertropfen auf der Haut, man sieht jedoch nur wenig.

Hier hilft die High-Speed-Kamera enorm, wobei auch die zunächst eingestellte Zeitauflösung von 600 fps noch zu niedrig war, um genauer zu sehen, wie die Spritzgurke ihre Samen ausstößt; erst bei 1200 fps sieht man genau, wie Samen und Flüssigkeit aus dem Loch, das der abgeknickte Stängel hinterlassen hat, austreten. Wie man sieht, wurde die Frucht für diesen Versuch mit der Hand fixiert. In der darauffolgenden Szene sieht man, wie ein Exemplar durch

das austretende Samen-Flüssigkeits-Gemisch beschleunigt wird – ein pflanzlicher Raketenantrieb.

Die Physik:

Wie oben erwähnt, sind die Früchte der Spritzgurke sehr hart, und zwar aufgrund der Tatsache, dass der Zellinnendruck (Turgor) sehr hoch ist. Sobald man nun die Frucht an einer Stelle verletzt bzw. den Stängel abknickt, entweichen durch den sich nun abbauenden Druck Flüssigkeit und Samen mit recht hoher Geschwindigkeit. Hält man die Frucht währenddessen nicht fest, so wird diese in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt, und zwar aufgrund der Impulserhaltung des Gesamtsystems Frucht – Samen. Mathematisch lässt sich dies folgendermaßen ausdrücken:

Für ein System von N Teilchen gilt für den Gesamtimpuls

$$\vec{p}_{ges} = \sum_{i=1}^N m_i \cdot \vec{v}_i \quad (3.50)$$

mit N als der Anzahl der Teilchen, m_i der Masse jedes einzelnen Teilchens und v_i der Geschwindigkeit jedes einzelnen Teilchens. Aufgrund des Gesetzes der Impulserhaltung für ein abgeschlossenes System gilt auch

$$\frac{d}{dt} \vec{p}_{ges} = 0 \quad (3.51)$$

das heißt, der Gesamtimpuls bleibt immer gleich, die Änderung mit der Zeit t ist Null.

Für unser System, welches aus Samen/Flüssigkeit und der Frucht selbst besteht, bedeutet das das Folgende:

$$m_F \vec{v}_F = m_S \vec{v}_S \quad (3.52)$$

mit m_F als der Masse der Frucht, v_F als ihrer Geschwindigkeit, m_S als der Masse des ausgestoßenen Samenmaterials und v_S als deren Geschwindigkeit.

Dieser Ausdruck besagt, dass, wenn die Samen mit ihrer Masse m_S und einer Geschwindigkeit v_S in die eine Richtung fliegen, die Frucht mit ihrer Masse m_F sich mit einer der Gleichung genügenden Geschwindigkeit v_F in die genau entgegengesetzte Richtung bewegen muss. Besonders eindrucksvoll können wir diesen Sachverhalt beim Start einer Rakete beobachten aber eben auch hier, beim „Zünden“ der Spritzgurke.



Abb. 63: Startendes Space-Shuttle



Abb. 64: „Startende“ Spritzgurke

Sowohl bei der Rakete als auch bei der Spritzgurke muss man jedoch in Betracht ziehen, dass die Masse m_F nach dem Start geringer, die Frucht leichter wird, da ja Material ausgestoßen wird! Deshalb wird die Spritzgurke nach dem Start sogar ein wenig schneller, sie beschleunigt. Der Massenausstoß und die daraus resultierende Beschleunigung sind in der bekannten Raketengleichung, welche von Konstantin Ziolkowski, später auch von den bekannten Raketenpionieren Hermann Oberth und Robert Goddard aufgestellt und verwendet wurde, dargestellt. Diese Gleichung wird im Folgenden näher betrachtet.

Zunächst führen wir das zweite Newton'sche Gesetz ein:

$$\frac{d(m_R \cdot \vec{v}_R)}{dt} = \vec{F} \quad (3.53)$$

Es ist das bekannte Gesetz, welches besagt, dass Kraft gleich Masse mal Beschleunigung ist und damit bei einem Körper der Masse m eine Änderung des Impulses bewirkt. \vec{F} steht hier für die Kraft, m_R für die Masse der Rakete und \vec{v}_R für die Geschwindigkeit, welche sich im Zeitintervall dt ändert. Eine Änderung der Geschwindigkeit pro Zeit bezeichnen wir als Beschleunigung, womit wir die bekannte Formulierung des Gesetzes erläutert haben. Eine

Rakete der Masse m_R , auf die also die externe Kraft \vec{F} wirkt, verändert ihre Geschwindigkeit und damit ihren Impuls pro Zeiteinheit dt um den Wert \vec{v}_R .

Woher kommt diese externe Kraft \vec{F} ? Sie ergibt sich aus dem Massenausstoß, der von der Verbrennung des Treibstoffes herrührt. Der Massenausstoß lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$\vec{F} = \dot{m}_T \cdot \vec{v}_{eq} = \frac{dm_T}{dt} \cdot \vec{v}_{eq} \quad (3.54)$$

\vec{v}_{eq} bezeichnet hier die Austrittsgeschwindigkeit der bei der Verbrennung des Treibstoffes entstehenden Gase; \dot{m}_T bzw. $\frac{dm_T}{dt}$ bezeichnen die pro Zeiteinheit dt ausgestoßene Treibstoffmasse m_T .

Wir können die beiden Ausdrücke also miteinander gleichsetzen:

$$\frac{d(m_R \cdot v_R)}{dt} = \frac{dm_T}{dt} \cdot \vec{v}_{eq} \quad (3.55)$$

Wir kürzen die Zeitableitungen und erhalten

$$d(m_R \cdot \vec{v}_R) = dm_T \cdot \vec{v}_{eq}. \quad (3.56)$$

Unter Anwendung der Produktregel erhalten wir

$$\vec{v}_R dm_R + m_R d\vec{v}_R = dm_T \cdot \vec{v}_{eq} \quad (3.57)$$

Wir bewegen uns immer mit der Rakete, deswegen interessiert uns nur die Änderung der Geschwindigkeit. Deshalb setzen wir $\vec{v}_R = 0$ und erhalten die Bewegungsgleichung

$$m_R d\vec{v}_R = dm_T \cdot \vec{v}_{eq} \quad (3.58)$$

Die Masse der Rakete m_R setzt sich aus zwei Teilmassen zusammen, der Masse der Rakete im leeren Zustand m_L und der zeitabhängigen Masse des Treibstoffes $m_T(t)$:

$$m_R = m_L + m_T(T) \quad (3.59)$$

Wir definieren für die Startmasse der Rakete:

$$m_{start} = m_L + m_T(t_0) \quad (3.60)$$

Also die Leermasse der Rakete und die Treibstoffmasse zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ s .

Für die Endmasse definieren wir:

$$m_{End} = m_L \quad (3.61)$$

Die Masse der leeren Rakete ändert sich nicht, die Masse des Treibstoffs in der Rakete dagegen sehr wohl. Die Masse der Rakete verändert sich also mit der Masse des ausgestoßenen Treibstoffs

$$dm_R = -dm_T \quad (3.62)$$

Dies setzen wir in die Bewegungsgleichung aus 3.58 ein und erhalten

$$m_R d\vec{v}_R = -\vec{v}_{eq} dm_R \quad (3.63)$$

Und nach Umformung nach $d\vec{v}_R$

$$d\vec{v}_R = -\vec{v}_{eq} \cdot \frac{dm_R}{m_R} \quad (3.64)$$

Wir integrieren über diesen Ausdruck und erhalten

$$\Delta\vec{v}_R = -\vec{v}_{eq} \cdot \ln m_R \quad (3.65)$$

Und weil

$$m_R = m_L + m_T(T) \quad (3.66)$$

gilt, erhalten wir für die ideale Raketengleichung nach Ziolkowsky

$$\Delta \vec{v}_R = \vec{v}_{eq} \cdot \ln \frac{m_{Start}}{m_{End}} \quad (3.67)$$

Diese Gleichung ist anwendbar, wenn der verbrannte Treibstoff tatsächlich mit konstantem Druck ausgestoßen wird. Für das Space Shuttle trifft dies weitgehend zu; hier übernehmen Turbopumpen die Versorgung der Brennkammern mit Treibstoff. Die Spritzgurke besitzt keine Turbopumpe, deshalb nimmt der Beschleunigungswert nach dem „Start“ relativ schnell ab.

High-Speed-Insekten: Die Italienische Schönschrecke (*Calliptamus italicus*) und die Gottesanbeterin (*Mantis religiosa*)

Dieser Abschnitt bezieht sich auf zwei Videos, welche ich im Zuge der Arbeit mit der High-Speed-Kamera Casio Exilim aufgenommen habe: den Sprung einer Italienischen Schönschrecke und eine Gottesanbeterin beim Jagen. Die Heuschrecke fand ich auf einer Wiese in Kroatien, die Gottesanbeterin saß auf meinem Fensterbrett in der Sonne.

Versuchsaufbau:

Heuschrecke: Fangen, nicht verletzen, vor dem Kameraobjektiv auf den Boden setzen, warten.

Gottesanbeterin: Finden, nicht verletzen, tote Fliege in einigen cm Entfernung vor der Gottesanbeterin platzieren, warten.

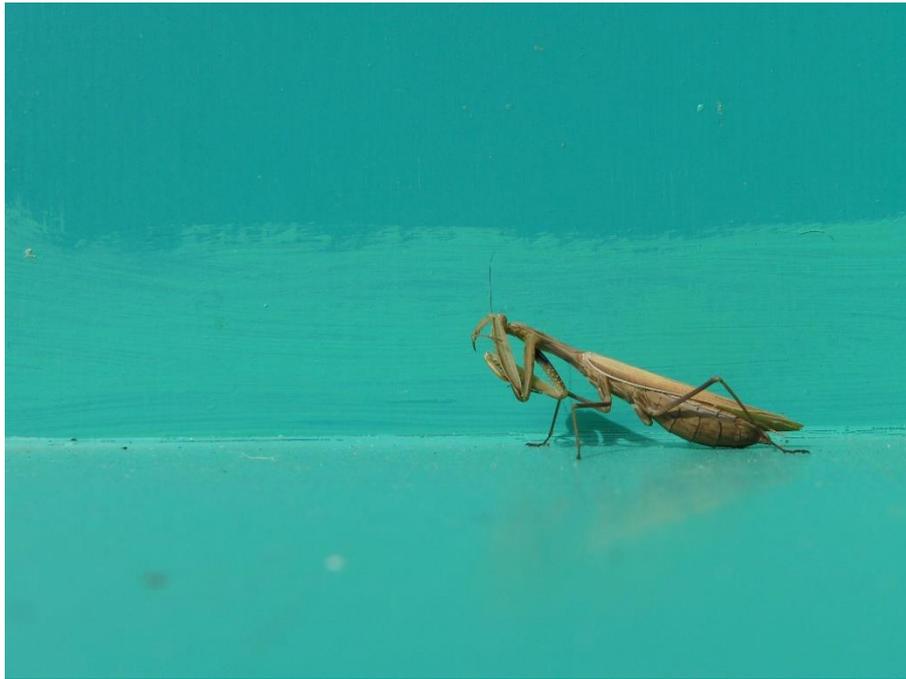


Abb. 65: Die Gottesanbeterin nach dem Verspeisen der Fliege

Beobachtung:

Im Film mit der Heuschrecke ist der Absprung gut zu sehen. Die Italienische Schönschrecke besitzt zwei Paar Flügel, welche sie, wie wir sehen, erst nach dem Absprung in einigen cm Höhe über dem Boden entfaltet, um dann mit deren Hilfe weiterzufliegen. Somit ist die Italienische Schönschrecke weitaus mobiler und nicht alleine auf das Springen zur Fortbewegung angewiesen; bei günstigen Verhältnissen kann ein solches Insekt ohne weiteres in kurzer Zeit ~20 m im Flug zurücklegen und ist so vor Angriffen bodengebundener Feinde gut geschützt.

Eindrucksvoll zeigt sich im Video auch, wie die langen Hinterbeine der Heuschrecke als „Katapult“ wirken. Die Hebelwirkung dieser langen Beine befähigt die Heuschrecke zur raschen Beschleunigung entgegen der Erdanziehungskraft.

Die Gottesanbeterin ist bekannt für ihr Jagdverhalten, welches mit einer High-Speed-Kamera sehr gut analysiert werden kann. Mit freiem Auge ist das blitzschnelle Fangen der Beute durch Ausfahren der vorderen Fangbeine fast nicht erkennbar. Im vorliegenden Fall wurde eine tote Fliege vor der am Fensterbrett sitzenden Gottesanbeterin platziert. Diese bewegte sich fast unmerklich langsam auf die Fliege zu, um schließlich die letzten cm im Sprung zurückzulegen. Dabei wurden die vorderen Fangbeine ausgefahren und die Fliege eingeklemmt. Einem lebendigen Insekt wird eine Flucht nach dem Einklemmen unmöglich, da die Fangbeine mit

Haken bewehrt sind. Sofort nach dem Fangen der Fliege beginnt die Gottesanbeterin, diese aufzufressen.

High-Speed-Holzspalten:

Im Herbst 2014, als ich gerade mit dem Erstellen von Versuchsvideos beschäftigt war, besuchte ich Prof. Pottlacher zu Hause. Er war gerade mit dem Spalten eines Fichtenstammes beschäftigt, und wir entschlossen uns, dies mittels der High-Speed-Kamera zu dokumentieren.

Aufbau:

Ein Stück eines Baumstammes wurde auf dem Boden platziert. Ein Eisenkeil und ein schwerer Hammer (5 kg) liegen griffbereit.

Durchführung:

Der Keil wird in der Mitte des Baumstammes angesetzt, mit dem Hammer beginnt man, auf den Keil zu schlagen. Nach einigen Schlägen entsteht im Stamm ein Sprung, nach weiteren Schlägen zerbricht der Stamm in zwei Hälften.

Beobachtung:

In diesem Video wird ersichtlich, dass die Gartenwiese als Unterlage für ein solches Vorhaben nicht besonders gut geeignet ist – jeder Schlag wird durch den weichen Untergrund ein wenig abgefedert. Energetisch wäre es also günstiger, eine harte Unterlage zu wählen, wo der auf dem Boden ruhende Stamm dem Hammerschlag nicht nachgibt.

Auch ist gut zu erkennen, dass jeder Hammerschlag auf den Keil diesen zum leichten Schwingen anregt – wie zu erwarten, schwingt der Keil mit kürzerer Schwingungsdauer, je tiefer er bereits ins Holz eingedrungen ist, je kürzer also der Keil an der Luft ist.

Wie schon einige Male in dieser Arbeit können wir auch hier wieder „Trägheit beobachten“ – auf dem Baumstamm liegen kleine Rinden- bzw. Holzstückchen, bei jedem Hammerschlag sinkt der Baumstamm ein Stück nach unten, die lose auf dem Stamm liegenden Holzstückchen „folgen“ ihm jedoch nicht sogleich. Auch werden sie durch den zurückfedernden Baumstamm ein kleines Stück in die Höhe katapultiert.

Weiters kann man beobachten, dass der Schlag auf den Baumstamm die ganze Umgebung des Baumstammes beeinflusst. So beginnt die Kamera nach jedem Schlag ein wenig zu wackeln, was sich im Film bemerkbar macht. Es ist dies ein Resultat der Vibrationen des Erdreichs um den Stamm, welche durch den Hammerschlag ausgelöst wurden.

3.5 Weitere High-Speed-Experimente

Elihu-Thompson-Versuch:

Aufbau:

Eine Spule wird über einen variablen Vorwiderstand mit einer Wechselspannungsquelle verbunden. Der Vorwiderstand wird zunächst auf einen eher hohen Widerstandswert eingestellt; so kann man gewährleisten, dass der Effekt sich nicht zerstörerisch auswirkt. Hat man die Funktion des Experiments mit einem hohen Widerstandswert überprüft, kann man diesen leicht absenken, um spektakulärere Ergebnisse zu erreichen.

Die Spule wird uns als Elektromagnet dienen. Um die Magnetwirkung zu verstärken, wird die Spule über ein Eisenjoch gestülpt. Ein Aluminiumring von einigen Zentimeter Breite wird über das Joch gestülpt und auf die Spule gelegt.

Durchführung:

Die Spannungsquelle wird je nach gewünschter Effektstärke eingestellt. Um den Ring, wie im Video zu sehen, fortfliegen zu lassen, stellt man einen eher hohen Spannungswert ein. Wie beim Vorwiderstand wird jedoch auch hier empfohlen, mit einer Sicherheitsvariante zu beginnen.

Betätigt man nun den Schalter, wird der Aluminiumring je nach Spannung entweder angehoben oder überhaupt vom Joch weg in die Höhe geschleudert. Es ist darauf zu achten, dass sich im Moment des Betätigens des Schalters niemand sehr nahe am Joch aufhält oder sich gar darüber beugt.

Die Verwendung von Wechselspannung bringt mit sich, dass der Aluminiumring, solange er sich im Einflussbereich der Spule bzw. des Jochs befindet, mehrmals beschleunigt wird und deshalb recht hoch springt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich mit der Änderung der

Stromrichtung auch die Polung der entstehenden Magnetfelder ändert. Jedes Mal, wenn sich die Felder neu aufbauen, wird der Ring weiter beschleunigt. Bei Verwendung von Gleichstrom passiert der Vorgang der Induktion nur einmal, sodass der Ring nicht so oft beschleunigt wird und daher nicht so hoch springt.

Beobachtung:

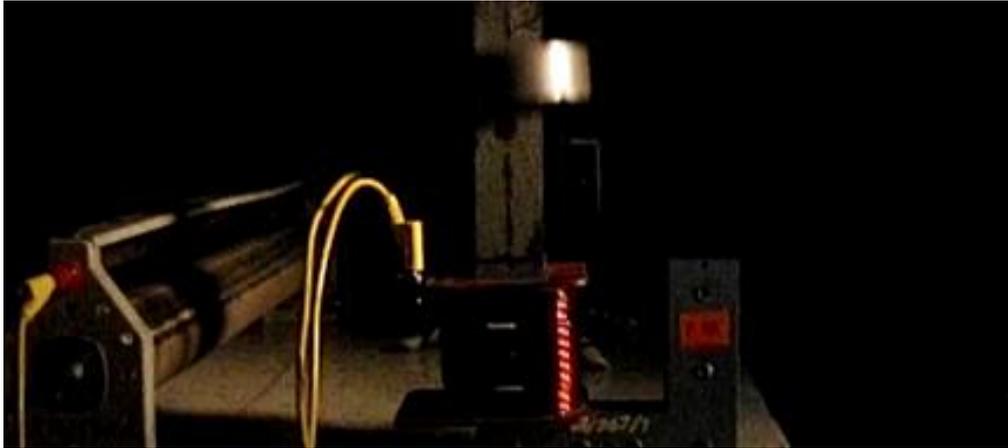


Abb. 66: Der Aluminiumring beim Abheben

Der Aluminiumring wird in die Höhe geschleudert, sobald die Spule vom Strom durchflossen wird. Es ist darauf hinzuweisen, dass der Versuch nur mit einem durchgehenden, nicht mit einem unterbrochenen Ring funktioniert. Die Gründe hierfür werden im folgenden Unterpunkt erläutert.

Die Physik:

Dieser Versuch ist ein eindrucksvolles Beispiel der Wirkung der magnetischen Induktion. Es existieren mehrere Varianten des Versuchs – der Elihu-Thomson-Ring-Versuch, die Gauß'sche Magnetkanone usw. Sie alle machen sich das Prinzip der magnetischen Induktion auf die eine oder andere Weise zunutze.

Im vorliegenden Fall wurde eine Anordnung nach Elihu Thomson verwendet, einem englischen Physiker des späten 19. bzw. frühen 20. Jahrhunderts. Hierbei wird ein Eisenring über ein Eisenjoch, welches gleichzeitig den Kern der verwendeten Spule bildet, gestülpt. Lässt man nun durch die Spule Strom fließen, so baut sich um die Spule ein Magnetfeld auf. Dieser Umstand wird im Versuchsabschnitt „Lautsprecher wird bespielt“ näher erklärt. Das sich bildende Magnetfeld sieht folgendermaßen aus:

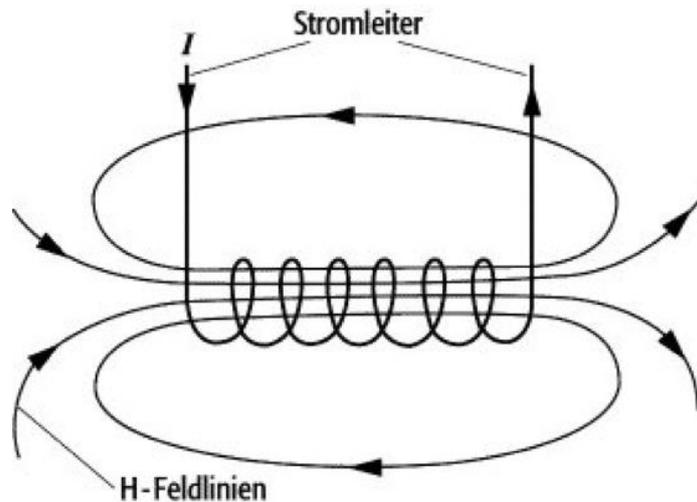


Abb. 67: Magnetische Feldlinien bei stromdurchflossenen Spulen

Gemäß den Maxwell'schen Gleichungen bzw. dem Ampère'schen Gesetz (siehe hierzu nochmals „Lautsprecher wird bespielt“) bildet sich ein quellenfreies Wirbelfeld um die Spule. Die Feldlinien treten auf der einen Seite der Spule aus, laufen dann außen an der Spule entlang in Richtung anderer Spulenseite, wo sie wieder in die Spule hineintreten und im Inneren der Spule weiterlaufen bis zurück an die Austrittsstelle.

Die Flussdichte des Magnetfelds (also die Dichte der Feldlinien und damit die „Magnetfeldstärke“) kann man durch das Einführen eines Eisenkerns in die Spule noch verstärken. So ist die Formel für die Magnetische Flussdichte einer stromdurchflossenen Spule:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{n}{l} \quad (3.68)$$

mit \vec{B} als Flussdichte, μ_0 als magnetischer Permeabilitätskonstanter, I als Strom, n als Windungszahl und l als Länge der Spule.

Führen wir einen Eisenkern ein, so verstärkt sich die Flussdichte um den Faktor μ_{Fe} , also einer magnetischen Permeabilitätskonstanten für verschiedene Stoffe, in diesem Fall *Ferrum*, Eisen. Die Formel schreibt sich dann:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu_{Fe} \cdot I \cdot \frac{n}{l} \quad (3.69)$$

Vom Lautsprecher-Versuch wissen wir schon: Stromdurchflossene Leiter bilden Magnetfelder aus, umgekehrt wird in einem Leiter, der sich relativ zu einem Magnetfeld bewegt, ein

Spannung und damit ein Strom induziert. Genau dies ist hier der Fall; ob sich der Ring durch ein „stehendes“ Magnetfeld bewegt oder der Ring fixiert ist und das Magnetfeld sich verändert, ist egal. Diese „Induktionsspannung“ hängt zusammen mit der bekannten „Lorentzkraft“, ihre Entstehung werden wir nun genauer betrachten.

Das Prinzip der elektromagnetischen Induktion besagt, dass in einem Leiter, der durch ein Magnetfeld bewegt wird, eine Spannung erzeugt („induziert“) wird, da durch das Magnetfeld auf die im Leiter frei beweglichen Ladungsträger eine Kraft ausgeübt wird. Diese „Bewegung“ durch das Magnetfeld ist hier als Änderung der Feldliniendichte zu verstehen! Der Leiter muss sich nicht selbst bewegen, es muss sich nur die Feldliniendichte des auf ihn wirkenden Magnetfelds ändern, also das Magnetfeld relativ zum Leiter bewegen. Dies kann erreicht werden, indem sich entweder der Leiter tatsächlich durch ein Magnetfeld bewegt, oder indem der Leiter fixiert ist und ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld auf ihn wirkt, wie z.B. bei einem Transformator. Im Folgenden wird der Vorgang der Einfachheit halber immer als „Bewegung durch ein Magnetfeld“ bezeichnet.

Das Gesetz von Lorentz besagt, dass sich die Kraft auf eine Ladung in einem Leiter aus der Summe zweier Teilkräfte ergibt:

$$\vec{F}_{ges} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.70)$$

\vec{F}_E beschreibt jene Kraft, die eine Ladung in einem elektrischen Feld erfährt (Allgemein bekannt als „Coulomb-Kraft“):

$$\vec{F}_E = q \cdot \vec{E} \quad (3.71)$$

mit q als Ladung und \vec{E} als elektrische Feldstärke.

\vec{F}_B beschreibt die Kraft, die eine Ladung erfährt, wenn sie sich relativ zu einem Magnetfeld bewegt:

$$\vec{F}_B = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.72)$$

mit q als Ladung, \vec{v} als Geschwindigkeit, mit der sich der Leiter durchs Magnetfeld bewegt und \vec{B} als magnetischer Flussdichte (der „Stärke“ des Magneten).

Bei Abwesenheit eines externen elektrischen Feldes wird $\vec{F}_E = 0$ und, wir betrachten nur \vec{F}_B .

Die Kraft \vec{F}_B wirkt je nach Art der Ladungsträger (+, -) in unterschiedlicher Richtung, was dazu führt, dass sich bei einem Leiter, welcher relativ zu einem Magnetfeld bewegt wird, die negativen Ladungsträger (Elektronen) am einen Ende des Leiters sammeln, die positiven Ladungsträger (Positive Ionen, Protonen), am anderen Ende. Dies bewirkt die Entstehung eines elektrischen Potentialfeldes, welches mit einem Messgerät als Spannung gemessen werden kann. Je schneller der Leiter und das Magnetfeld sich relativ zueinander bewegen, desto höher ist die entstehende Spannung:

$$U_{ind} = -\frac{d}{dt} \cdot \int \vec{B} \cdot dA = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (3.73)$$

U_{ind} steht für die induzierte Spannung. $-\frac{d}{dt} \cdot \int \vec{B} \cdot dA$ beschreibt ein Flächenelement dA , in welchem die magnetische Flussdichte \vec{B} herrscht, und welches vom Leiter in einer Zeit dt durchquert wird. Mit

$$\int \vec{B} \cdot dA = \Phi_m \quad (3.74)$$

wir Φ_m , den magnetischen Fluss. Die induzierte Spannung U_{ind} ergibt sich also aus der Änderung des magnetischen Flusses pro Zeitelement dt . Je schneller also ein Leiter eine Veränderung der magnetischen Feldliniendichte erfährt, das heißt je größer die Änderung des magnetischen Flusses $\frac{d\Phi_m}{dt}$ ist, desto höher ist die induzierte Spannung.

Durch den Einfluss des von der Spule ausgehenden Magnetfeldes wird also im Aluminiumring eine Spannung und damit ein Strom, genauer gesagt, ein *Kreisstrom* induziert. Dies ist tatsächlich ein Strom, der im Ring im Kreis läuft. Und wir wissen: Ströme erzeugen Magnetfelder, so auch dieser Kreisstrom. Jedoch ist die Richtung des induzierten Kreisstroms der Richtung des erzeugenden Stroms in der Spule immer entgegengesetzt! Dies besagt die *Lenz'sche Regel*, ein wichtiges Gesetz der Induktionslehre: die Entstehung eines Stroms, der die gleiche Richtung hat, wie der erzeugende Strom, widerspräche dem Gesetz der Energieerhaltung. Einen solchen Umstand könnte man für ein Perpetuum Mobile nützen, eine sich selbst mit Energie versorgende Maschine: Ein Ding der Unmöglichkeit.

Der Kreisstrom als Ursache für den beobachtbaren Effekt ist auch der Grund dafür, dass der verwendete Aluminiumring nicht unterbrochen sein darf – in einem unterbrochenen Ring kann sich kein Kreisstrom ausbilden und der Effekt kommt nicht zustande.

Weiters ist für uns wichtig, die Richtung des entstandenen Magnetfeldes um den Leiter zu kennen. Diese geht aus der „Rechten-Faust-Regel“ hervor: Blickt man entlang des Leiters in Richtung des Stromflusses, so dreht das entstehende Magnetfeld immer im Uhrzeigersinn.

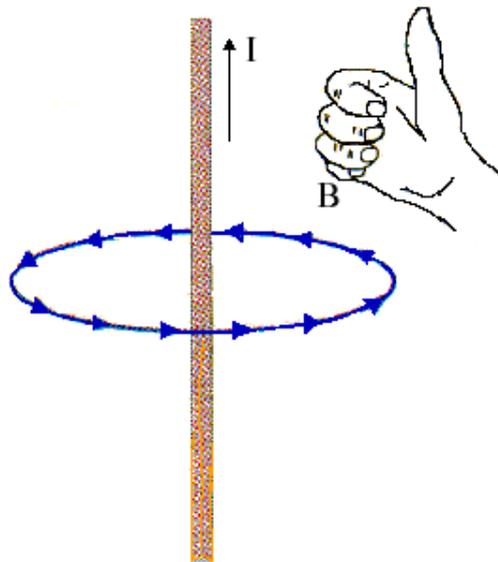


Abb. 68: die Rechte-Faust-Regel.

Warum springt nun der Aluminiumring hoch? Weil zwei Magnetfelder entstanden sind: eines mit der Spule als Erzeuger, eines mit dem Ring als Erzeuger. Die Lage der beiden Magnetfelder zueinander bedingt eine Abstoßung, weshalb der Ring je nach eingestelltem Spulenstrom mehr oder weniger abgestoßen wird.

Lichtbogenentladung – Jacob's Ladder:

Aufbau:

Aus dem Experimentefundus der TU Graz stammt ein Gerät zur Erzeugung von Durchschlagsentladungen / Plasmaentladungen. Dieses Gerät transformiert die Netzspannung von 230 V zu einer Mittelspannung von 10 kV. Diese Spannung wird an zwei Metallelektroden gelegt, die oben aus dem Gerät herausragen. Nahe am Gerät sind diese Elektroden eng beisammen, nach oben laufen sie auseinander; die Gründe hierfür werden später erläutert.

Durchführung:

Das Hochspannungsgerät wird eingeschaltet. Stehen die Elektroden in günstiger Position zueinander, so beginnen die Entladungen. Ist die Entfernung ungünstig gewählt, so wird entweder keine Entladung auftreten oder nur eine sehr kurze am unteren Ende der beiden Elektroden. In diesem Fall muss das Gerät ausgeschaltet werden, die Elektroden sicherheitshalber mit einem geeigneten Gegenstand (Laborkabel) entladen und der Abstand neu eingestellt werden.

Beobachtung:



Abb. 69: Ausschnitt aus dem Echtzeitvideo „Lichtbogenentladung“



Abb. 70: Ausschnitt aus dem High-Speed-Video „Lichtbogenentladung“

Bei günstigem Abstand der Elektroden zueinander beobachten wir eine nach oben steigende Entladung. Im Echtzeitvideo sehen wir rasch aufeinanderfolgende Blitze, die, begleitet von einem lauten Surren, nach oben steigen und dann mit einem Knall abreißen. Danach beginnt das Ganze von neuem.

Im Zeitlupenvideo bei 600 fps sehen wir, dass die Entladung wie auf einer Leiter nach oben wandert. Je weiter sie nach oben kommt, desto mehr „biegt“ sie sich nach oben; der Bereich in der Mitte zwischen den Elektroden befindet sich stets höher als die Bereiche am Rand, wo Kontakt zum Metall besteht. Ist die Entladung am Ende der beiden Elektroden angelangt, erlischt sie nicht sofort, sondern brennt noch kurz weiter. Während dieser kurzen Zeit bildet sie sich noch stärker bogenförmig aus, und erlischt, sobald der Bogen eine gewisse Länge erreicht hat.

Weiters können wir auch ein „Flimmern“ der Entladung beobachten; es zeigt sich hier, dass das Gerät mit 50 Hz - Wechselspannung betrieben wird, was zu Helligkeitsschwankungen bzw. kurzzeitigem Erlöschen beim „Nulldurchgang“ der Spannung führt. Durch diesen Umstand wird auch der „leiterhafte“ Aufstieg der Entladung gut sichtbar.

Zu alledem beobachten wir im oberen Bereich der Elektroden auch mehrfarbige Plasmen; zum bekannten Blau der Entladung kommen gelb/orange Flämmchen, welche sich immer von derselben Elektrode lösen, in Richtung der anderen Elektrode wandern und nach kurzer Zeit erlöschen.

Die Physik:

Zur Erklärung der Lichtbogenentladung in diesem Versuch nutzen wir Erkenntnisse aus der Elektrizitätslehre, aus der Thermodynamik und sogar aus der Quantenmechanik.

Lichtbogenentladungen dieser Art können im Alltag und in der Natur häufig beobachtet werden; immer in Verbindung mit Hochspannung, also hohen elektrischen Potentialen bzw. Feldstärken. Wir sehen solche Entladungen in großen und kleinen Ausprägungsformen in Umspannwerken, bei der Kontaktaufnahme der Stromnehmer bei der Bahn, in modernen Feuerzeugen, bei Blitzen und am Abend auf der Couch, wenn man sich eine Woldecke überwirft und plötzlich knisternde Funken zwischen Decke und Kleidung auftreten.

All diese Entladungen entstehen durch elektrische Potentialunterschiede (Spannungen) zwischen zwei „Polen“, die durch einen Funken bzw. Blitz ausgeglichen werden. Die Ursachen für solche Spannungen können ganz unterschiedlich sein, die Entstehung des Funkens jedoch ist jedoch immer mit der Wirkung eines elektrischen Feldes erklärbar. Elektrische Felder existieren überall dort, wo etwas geladen, also elektrisch nicht neutral ist. Auf atomarer Ebene bedeutet „elektrisch nicht neutral“ einen Überschuss an Protonen (positive Ladung) oder an Elektronen (negative Ladung). Nun bilden sich elektrische Felder um diese Ladungen herum aus und wirken auf andere Ladungen, welche in dieses Feld eingebracht werden, mit einer Kraft. Ein solches Feld lässt sich in skalarer Form folgendermaßen darstellen:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2} \quad (3.75)$$

mit $E(r)$ für die Feldstärke, ϵ_0 als elektrische Feldkonstante, Q als Ladungsmenge und r als Abstand zur Position dieser Ladungsmenge. Es ist dies also die Formel für die Feldstärke $E(r)$ einer Punktladung. Ein solches Feld sieht folgendermaßen aus:

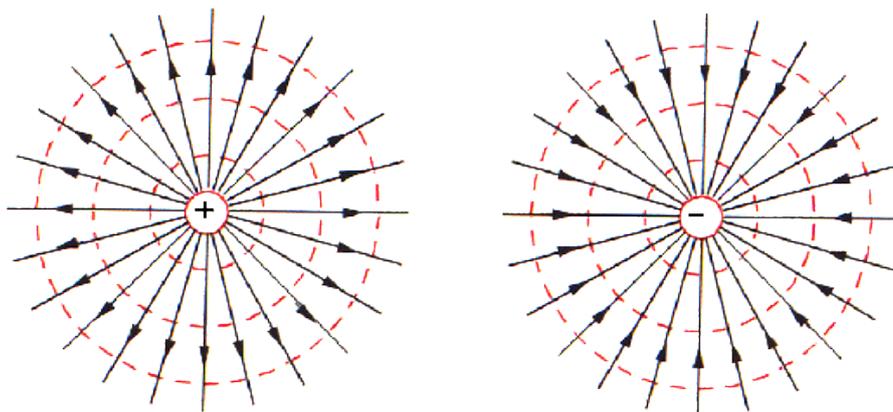


Abb. 71. Feldlinienbilder einzelner elektrischer Ladungen.

Bringt man nun einen elektrisch nicht neutralen Gegenstand (also einen Gegenstand, der positiv oder negativ geladen ist) in dieses Feld ein, so wirkt auf diesen, wie schon erwähnt, eine Kraft, nämlich die Coulombkraft, welche sich in skalarer Form folgendermaßen schreibt:

$$F_C(r) = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2} \quad (3.76)$$

Dies ist die Kraft, die auf einen Gegenstand mit der Ladung q im Feld der Ladung Q wirkt. Diese Kraft äußert sich, indem die Probeladung q , je nachdem, ob sie gleichnamig oder nicht gleichnamig mit der Feldladung ist, von dieser abgestoßen oder angezogen wird.

Jedoch haben wir es in unserem Versuch nicht mit einem Feld, welches sich aus einer Ladung ergibt, zu tun, sondern mit einem Feld, welches von zwei elektrischen Polen herrührt, einem Dipolfeld. Ein solches sieht bei zwei ungleichnamigen Ladungen folgendermaßen aus

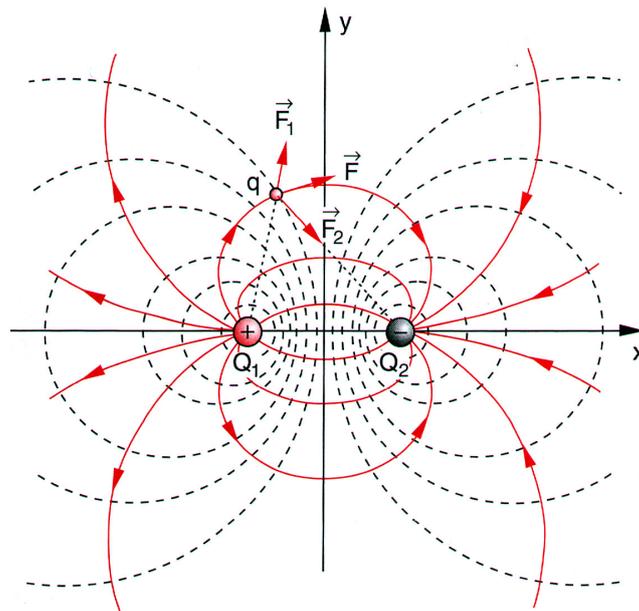


Abb. 72: Elektrisches Dipolfeld mit einander entgegengesetzten Ladungen

Mathematisch kann man, um die Feldstärke an einem Punkt P zu erhalten, die Feldstärke $E_1(P)$ für das eine Feld zur Feldstärke von $E_2(P)$ hinzuaddieren. Ebenso kann man, um die Kraft, welche auf eine Probeladung wirkt, zu ermitteln, die durch die beiden Ladungen hervorgerufenen Einzelkräfte vektoriell addieren, wie im Bild am Beispiel der Probeladung q zu sehen ist.

Wie kommt es nun zur Entladung bzw. zum Lichtbogen?

Liegt eine genügend hohe Spannung an, so werden durch die hohe Feldstärke einige Atome im Raum zwischen den Elektroden ionisiert, wodurch sie ihre elektrische Neutralität verlieren und durch das elektrische Feld eine Kraft erfahren, die sie zu einer der Elektroden hin beschleunigt. Die Atome werden ionisiert, da sie aufgrund der hohen Feldstärke „auseinandergerissen“ werden: Elektronen werden aus dem Atomverband gelöst, diese stellen dann negative Ladungen dar, übrig bleiben positiv geladene Atomrümpfe. Auch sind in der Luft auch schon vor dem Entstehen des Feldes einige Ionen enthalten, welche z.B. durch die Wirkung ionisierender Strahlung (kosmischer Höhenstrahlung) entstehen.

Diese verschiedenen Ladungen werden also in eine Richtung beschleunigt; auf ihrem Weg zur anziehenden Elektrode stoßen die Elektronen (welche aufgrund ihres geringen Gewichts sehr schnell werden) an weitere Atome, die dadurch wiederum ionisiert werden. Auf diese Weise wird die Luft zwischen den Elektroden innerhalb eines Augenblicks leitfähig, und die Entladung kann stattfinden. Zum charakteristischen Leuchten kommt es, da Elektronen und Atomrümpfe sich nicht nur trennen, sondern auch miteinander rekombinieren, das heißt, sie fügen sich wieder zu einem Atom zusammen. Wir haben gesehen, dass Energie nötig ist, um ein Elektron aus dem Atom herauszuheben, ebenso wird Energie frei, wenn ein Elektron sich wieder ins Atom einfügt. Besonders anschaulich lässt sich dies mit dem Bohr'schen Schalenmodell erklären, wonach jede Elektronenbahn (also jede mögliche Bahn, auf der ein Elektron sich befinden kann) eine definierte Energie besitzt. Je höher (weiter vom Kern entfernt) die Bahn, desto höher die Energie. Möchte man ein Elektron nun anheben, muss man Energie reinstecken, fällt ein Elektron auf eine niedrigere Bahn, so wird Energie frei, in Form von elektromagnetischer Strahlung. Besitzt diese Strahlung eine Wellenlänge innerhalb unserer Wahrnehmungsfähigkeit, so können wir diese als Licht wahrnehmen!

Auch erwärmt sich die Luft in der Umgebung einer solchen Entladung sehr stark. In der unmittelbaren Umgebung von Gewitterblitzen sind sogar Temperaturen von 30000°C möglich! Diese Erwärmung ist der Grund dafür, dass die Entladung zwischen den Elektroden nach oben steigt. Warme Luft besitzt eine geringere Dichte und damit bei gleichem Volumen eine geringere Masse als kalte Luft. Deshalb steigt sie nach oben und „zieht“ die Entladung mit.

Glühlampe in Normalatmosphäre:

Aufbau:

Eine Glühlampe wird mit einem sehr feinen Bohrer angebohrt, sodass ein kleines Loch im Glas entsteht. Die solcherart behandelte Lampe wird in eine gängige Lampenhalterung geschraubt und an eine Spannungsquelle angeschlossen.

Durchführung:

Die Lampe beginnt mit dem Einschalten der Spannungsquelle hell aufzuleuchten.

Beobachtung:



Abb. 73: Die Lampe kurz nach dem Einschalten des Spannungsversorgungsgeräts. Der von der Glühwendel ausgehende Dampf aus der Reaktion mit dem Sauerstoff ist gut zu erkennen.

Die Lampe leuchtet, sobald die Spannungsversorgung aktiviert ist, besonders hell auf. Bei einer Bildrate von 600 fps erkennt man, dass kurz nach dem Einschalten der Glühfaden zu verdampfen beginnt. Der entstehende Dampf entweicht durch das Loch in der Glühlampe, zurückbleibender Dampf beschlägt den Glaskolben. Nach einiger Zeit hellen Leuchtens brennt der feine Wolframdraht durch, das abgebrannte Ende fällt von der Halterung und schwingt noch ein paar Mal hin und her. Der Stromfluss ist damit unterbrochen, das Glühen der Lampe beginnt, abzuklingen.

Die Physik:

In diesem Versuch sehen wir, was passiert, wenn eine Glühlampe in Normalatmosphäre eingeschaltet wird. Tatsächlich ist der Glühfaden einer Glühlampe nämlich nicht von normaler Luft umgeben, sondern von einer „Schutzatmosphäre“, welche das, was wir in unserem Versuch gesehen haben, verhindern soll: ein unkontrolliertes, schnelles Abbrennen des Glühfadens. Dies kann entweder durch eine Evakuierung des Glaskolbens erreicht werden oder durch Einbringen eines Gases, welches weniger reaktiv ist als der Sauerstoff der Luft, z.B. Argon. Ist der Glaskolben beschädigt, kann das Argon ausweichen und Sauerstoff eindringen. Aktiviert man nun die Spannungsquelle, so beginnt der Wolframfaden in der Glühlampe zu leuchten, reagiert jedoch auch mit dem Sauerstoff der Luft und verbrennt mit hellem Leuchten und unter starker Rauchentwicklung.

Glühlampen sind im Allgemeinen Lampen, deren Wirkungsweise auf dem Prinzip der Erhitzung durch elektrischen Strom bzw. der thermisch bedingten Aussendung elektromagnetischer Strahlung beruht. Damit folgen diese Lampen dem Planck'schen Strahlungsgesetz, welches die Energieverteilung der Strahlung eines idealisierten schwarzen Körpers in Abhängigkeit der Frequenz darstellt:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (3.77)$$

$u(\nu, T)$ steht hier für die Energiedichte in Abhängigkeit der Temperatur und emittierten Frequenz. ν steht für die jeweilige emittierte Frequenz, c für die Lichtgeschwindigkeit, T für die Temperatur des schwarzen Körpers als Strahler. Das k steht für die Boltzmann-Konstante. Das h steht für das Plank'sche Wirkungsquantum, welches das Verhältnis zwischen Energie und Frequenz angibt gemäß der Formel $E = h \cdot \nu$.

Angewandt auf die Glühlampe funktioniert dieses Gesetz folgendermaßen:

Der Strom fließt durch den feinen Wolframdraht im Inneren der Glühlampe, welcher als ohmscher Widerstand wirkt. Dadurch heizt sich der Wolframdraht bis auf eine Temperatur von ca. 2000°C auf. Bedingt durch diese Aufheizung beginnt der Wolframdraht, elektromagnetische Strahlung zu emittieren. Das entstehende Spektrum ähnelt dem Spektrum des oben erwähnten schwarzen Körpers. Untenstehend sehen wir die Strahlungskurven verschiedener Körper gemäß des Planck'schen Strahlungsgesetzes. Ein Teil des Spektrums ist mit den Farben des Regenbogens hinterlegt; es ist dies jener Wellenlängenbereich, welchen wir als Licht sehen

können. Die 3000-Kelvin-Kurve, welche ihr Maximum im Infrarot-Bereich besitzt (also bei einer etwas größeren Wellenlänge als der größten für uns sichtbaren), entspricht in etwa der Spektralverteilung einer Glühlampe; hier sehen wir auch, dass sich ein Großteil der von der Glühlampe abgegebenen Strahlung im für uns unsichtbaren Wellenlängenbereich befindet.

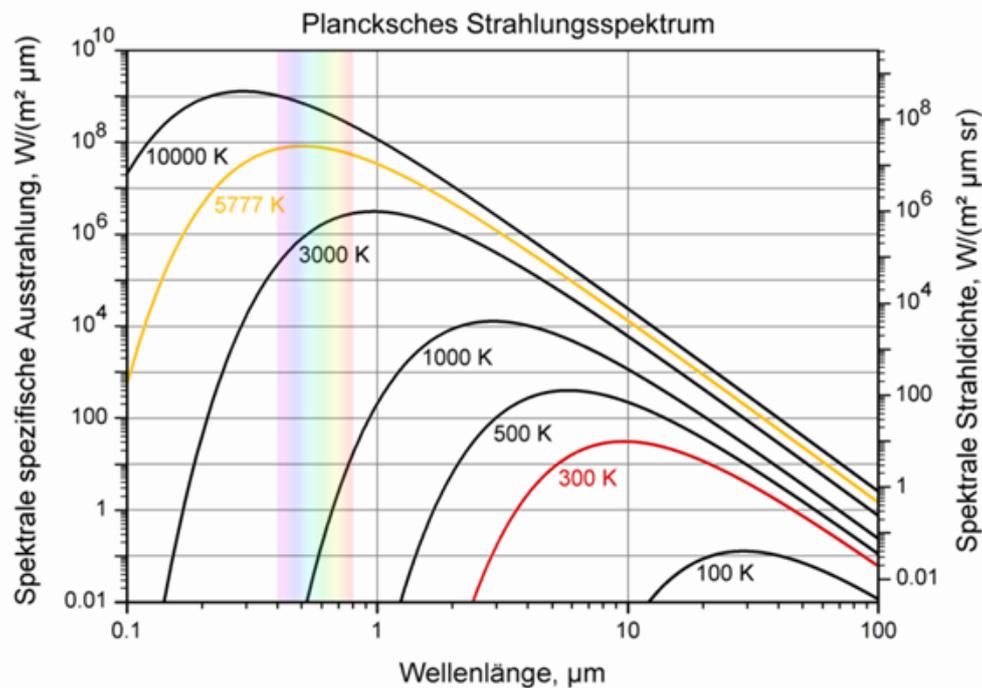


Abb. 74: Spektralverteilungen gemäß des Planck'schen Strahlungsgesetzes.

Die Leuchtstoffröhre und ihr Starter:

Im nun folgenden Abschnitt betrachten wir jene Vorgänge, die Leuchtstoffröhren zum Leuchten bringen. Leuchtstoffröhren sind sehr häufige Leuchtmittel und besitzen einige charakteristische Eigenschaften, die sich unter Benutzung von High-Speed-Imaging gut darstellen lassen. Leuchtstoffröhren bestehen aus den folgenden Komponenten:

- Spannungsversorgung
- Spule
- Die Röhre selbst – gasgefüllt (Argon-Quecksilber) und optisch beschichtet
- Starter

- Evtl. Drossel

Aufbau:

Der Starter einer Leuchtstoffröhre wird extern platziert und mittels geeigneter Kabel mit der Röhre verbunden. Normalerweise werden solche Starter an einem Röhrenende fix verbaut. Das Röhre-Starter-System wird an ein Spannungsversorgungsgerät angeschlossen.

Durchführung:

Die Spannungsversorgung wird aktiviert, der Starter und dann die Röhre beginnen zu leuchten.

Beobachtung:



Abb. 75: Entladung des Starters der Leuchtstoffröhre

Bei 1200 fps können wir die Zündsequenz im Starter gut beobachten: bevor die Lampe zu leuchten beginnt, sehen wir im Starter eine Reihe von Entladungen. Diese passieren so schnell, dass nur bei dieser hohen Zeitauflösung die Entladungsfolge erkennbar ist. Der Grund dieser zahlreichen Entladungen wird weiter unten näher erklärt.

Die Physik:

Zunächst betrachten wir den „Starter“ der Leuchtstoffröhre genauer; seine Funktion ist physikalisch interessant und grundlegend wichtig für die Inbetriebnahme der Röhre.

Der Starter der Leuchtstoffröhre wird benötigt, um den Vorgang, welcher schließlich das Leuchten der Röhre hervorruft, in Gang zu bringen. Im Prinzip ähnelt der Starter einer Glimmlampe, also einer gasgefüllten Lampe mit zwei Elektroden, zwischen denen Entladungen stattfinden.

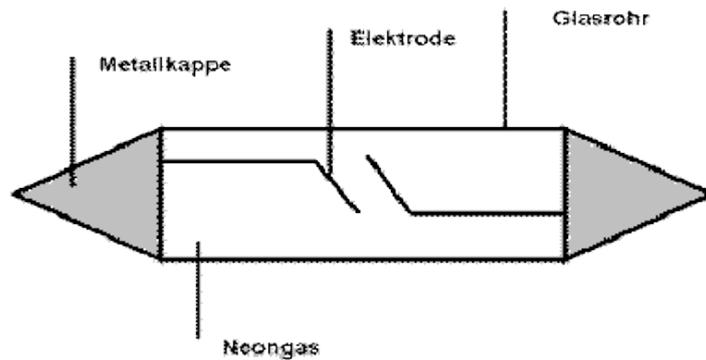


Abb. 76: Schematische Darstellung einer Glimmlampe

Die zwei Elektroden im Starter der Leuchtstoffröhre sind zwei Metallstreifen, zwischen welchen Entladungen passieren. Diese Entladungen werden hervorgerufen durch die angelegte Spannung, welche Ladungsträger zwischen den Elektroden beschleunigt und auf die Kathode auftreffen lässt, woraufhin aus der Kathode weitere Elektronen herausgeschlagen werden. Diese herausgeschlagenen Elektronen werden wiederum im elektrischen Feld beschleunigt und treffen auf Gasatome, welche so zum Leuchten angeregt werden. Durch die Entladungen bzw. die Lichtentwicklung erwärmen sich die beiden Metallstreifen, bis sie einander berühren. Dadurch erlischt die Entladung und es fließt Strom durch die Schaltung. Dies wiederum führt dazu, dass die Glimmelektroden wieder abkühlen und sich voneinander trennen, was die Lampe letztendlich zum Leuchten bringt. Die Gründe hierfür werden weiter unten erläutert.

Im High-Speed-Video ist gut zu sehen, dass die Entladungen bzw. das Glimmen mit Unterbrechungen und in abwechselnd unterschiedliche Richtungen funktionieren. Dies ist auf die verwendete Wechselspannung des öffentlichen Netzes (50 Hz) zurückzuführen.

Betrachten wir also als Nächstes die Röhre selbst.

Die Leuchtstoffröhre ist in den abgebildeten Schaltkreis integriert:

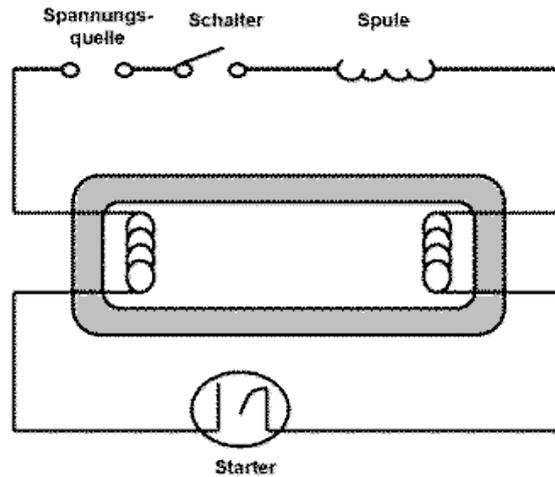


Abb. 77: Schaltbild einer Leuchtstoffröhre

Wir sehen den oben erwähnten Starter, dessen Funktionsweise wir schon kennengelernt haben. Wir wissen, dass die Erhitzung der Starterelektroden den Stromfluss beginnen lässt; dadurch kühlen sich die Elektroden wieder ab und trennen sich voneinander, der Stromfluss ist unterbrochen. Jetzt kommt die Spule ins Spiel: wir wissen, dass stromdurchflossene Leiter Magnetfelder ausbilden (siehe hierzu auch den Abschnitt „Lautsprecher“ bzw. „Elihu-Thomson-Versuch“); analog dazu wird in einem Leiter, der durch ein Magnetfeld bewegt wird, Spannung induziert. Nun wird diese Spule zwar nicht bewegt, durch das Abschalten des Stromes bricht aber ihr Magnetfeld zusammen; sie erfährt damit eine Änderung der Feldstärke, das Magnetfeld bewegt sich also relativ zur Spule! Dadurch wird kurzzeitig eine hohe Spannung induziert. Diesen Vorgang, bei dem ein Leiter durch sein eigenes, sich veränderndes Magnetfeld Induktion erfährt, nennen wir Selbstinduktion. Diese Selbstinduktion liefert die hohe Spannung, welche die Elektroden der Leuchtstoffröhre benötigen, um das Leuchten in Gang zu bringen.

Wie dies im Detail aussieht, sehen wir nun:

Im Inneren einer Leuchtstoffröhre befindet sich ein Argon-Quecksilber-Gasgemisch. Dieses Gasgemisch wird durch die kurzzeitig hohe Spannung angeregt – im Gas befindliche Ladungsträger (hauptsächlich Elektronen) werden durch das elektrische Feld zwischen den zwei Elektroden beschleunigt und stoßen auf Atome des Gasgemischs, welche dadurch angeregt werden. Durch die Relaxation (das „Abregen“) nach der Anregung senden die Atome Photonen (also kleine Energiepakete in Form von elektromagnetischer Strahlung) aus. Diese Photonen treffen auf die optisch beschichtete „Wand“, den Glaskolben der Leuchtstoffröhre.

Die Moleküle des Beschichtungsmaterials beginnen durch die Anregung mit der Energie der Photonen, ebenfalls elektromagnetische Strahlung zu emittieren, diesmal jedoch in einem für das Auge wahrnehmbaren Wellenlängenbereich.

Das hierbei entstehende Licht besitzt die charakteristische weißlich-bläuliche Farbe des Lichtes einer Leuchtstoffröhre.

Die Spektralanalyse dieses Lichtes zeigt einen sehr schmalen emittierten Frequenzbereich:

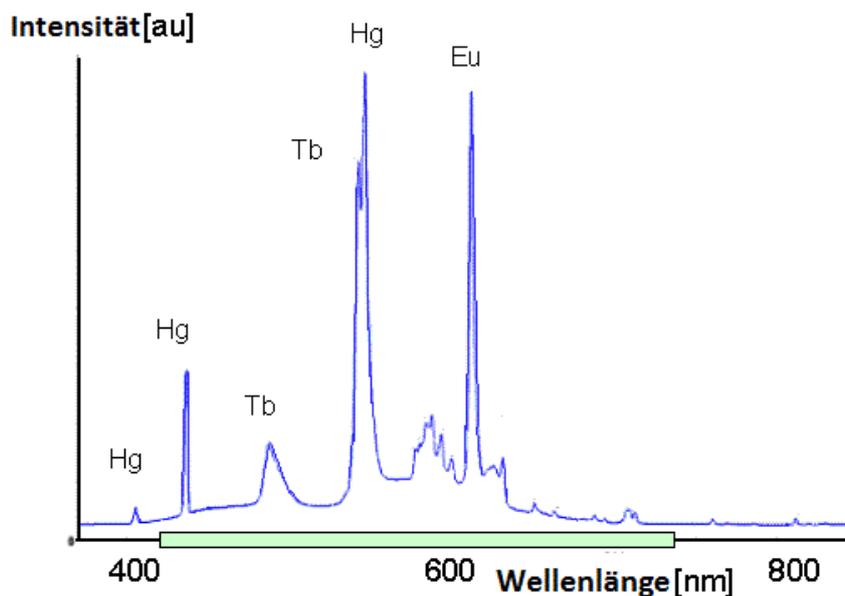


Abb. 78: Frequenzspektrum von Leuchtstoffröhren

Die sichtbaren Peaks, welche mit „Hg“ beschriftet sind, bezeichnen emittierte Frequenzen, welche von der Anregung durch von Quecksilberatomen ausgesandten Photonen herrühren. „Eu“ und „Tb“ bezeichnen Europium und Terbium, welche den sogenannten „Seltenen Erden“, einer bestimmten Elementgruppe im Periodensystem.

Ein wichtiger, noch nicht besprochener Umstand, der sich nur bei der Betrachtung mit High-Speed-Videos zeigt, ist das Flackern der Leuchtstoffröhre mit 50 Hz. Dies ist natürlich auf die Netzspannung (50 Hz Wechselspannung) zurückzuführen. Mit freiem Auge ist das Flackern nicht zu erkennen, für High-Speed-Aufnahmen ist eine solche Beleuchtung unbrauchbar, wie man sich bei Ansicht der Videos denken kann.

Brechende Spaghetti:

Als Außenstehender vermutet man im Bruchverhalten von Spaghetti wohl keines der fundamentalen Probleme der Physik, trotzdem ist dieses schon eingehend erforscht worden! Tatsächlich ergeben sich einige interessante Gesetzmäßigkeiten, und auch einige grundlegende Prinzipien der Physik können aus dem Brechen von Spaghetti abgeleitet werden.

Aufbau:

Benötigt wird eine geeignete, möglichste ebene Auflage, weiters ein paar Spaghetti beliebiger Marke und Herkunft.

Durchführung:

Ein Spaghetti wird zwischen zwei Auflagepunkte geklemmt. Als Auflagepunkte können hierbei entweder Daumen und Zeigefinger beider Hände, oder Daumen und Zeigefinger einer Hand und die Auflageplatte fungieren.

Der Spaghetti wird hierauf langsam in eine Richtung gebogen, bis er bricht. Dieses Experiment ist beliebig wiederholbar; man kann Spaghetti verschiedener Länge, Stärke und Herkunft auf ihr Brechverhalten untersuchen.

Beobachtung:

Wir stellen fest, dass Spaghetti nicht in zwei Teile zerbrechen, sondern in mehrere Teile, von denen wir zwei in den Händen behalten, die anderen jedoch unter Einhaltung bestimmter physikalischer Gesetze davonspringen bzw. –fliegen! Bricht ein Spaghetti z.B. in vier Teile, so behalten wir zwei in den Händen, die anderen zwei fliegen davon; währenddessen drehen sie sich in bestimmter Weise, wie wir noch sehen werden. Bricht ein Spaghetti in fünf Teile, so fallen außer den zwei Teilen in der Hand drei weitere an, welche davonfliegen. Wie stark bzw. in welche Richtung sich welche Teile drehen, wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. All dies wird im nächsten Abschnitt „Die Physik“ erklärt.

Die Physik:

Die Fragen, welche im Hinblick auf das Brechverhalten der Spaghetti interessant erscheinen, sind:

Wie kommt es zu unterschiedlichen Anzahlen von Brechprodukten?

Worauf basieren unterschiedliche Drehrichtungen und verschiedene Drehgeschwindigkeiten und damit Drehimpulse?

Zunächst zum Ereignis des Bruches bzw. der Entstehung unterschiedlicher Bruchstückzahlen:

Die Entstehung mehrerer Bruchstücke ist durch die Beobachtung mit dem bloßen Auge nicht einfach erklärbar. Grundsätzlich erwartet man das Folgende: Die Biegung (quasi die mechanische Spannung) des Spaghetti steigt → der Spaghetti bricht an einer bestimmten Stelle. Dadurch löst sich die Spannung. Warum sollte der Spaghetti jetzt, da die Spannung wieder verringert ist, nochmals brechen?

Dieses Phänomen lässt sich dadurch erklären, dass zwar die mechanische Spannung, welche vom Experimentator erzeugt wird, durch den Bruch abgebaut wird, die Bruchstücke, welche man in den Händen hält, deshalb aber nicht sofort zur Ruhe kommen. Durch das blitzschnelle „Loslassen“ der Spannung durch den Bruch schnellen die beiden ersten Bruchstücke in Richtung ihrer Ruhelage, jedoch schwingen sie noch einige Male um diese herum. Zudem werden beim Bruch sogenannte „Biegewellen“ induziert. Es sind dies Transversalwellen, welche sich in Form eines kleinen Knicks durch den Spaghetti fortpflanzen. An den Spaghettenden reflektieren solche Wellen (siehe hierzu die Versuchsbeschreibung zu „Reflexion von Wellen“); im Falle günstiger Überlagerung verstärkt sich der Knick so sehr, dass der Spaghetti an dieser Stelle erneut abbricht. All dies passiert sehr schnell, sodass auch die mir verfügbare High-Speed-Kamera keine genügende Zeitauflösung erreicht.



Abb. 79: Brechender Spaghetti

Nun, da wir wissen, warum der Spaghetti in mehr als zwei Teile zerbricht, können wir der Frage, wie sich diese Teile verhalten, auf den Grund gehen. Zu diesem Zwecke werden wir

zwei Videos mit einer Zeitauflösung von 600 fps analysieren: im ersten Video entstehen vier Bruchstücke, im zweiten fünf.

Im ersten Video können wir erkennen, dass zwei Bruchstücke in der Hand verbleiben, zwei weitere jedoch davonfliegen. Dabei drehen sie sich, und zwar in entgegengesetzter Richtung. Warum dies?

Es gilt hierbei einer der zahlreichen wichtigen Erhaltungssätze der Physik: das Gesetz der Erhaltung des Drehimpulses in einem abgeschlossenen System.

Was ist der Drehimpuls eigentlich?

Der Drehimpuls beschreibt den Zustand eines rotierenden Körpers mit dem Radius r und der Masse m , der sich mit einer Drehgeschwindigkeit v bewegt, bzw. einen Körper der Masse m , der sich mit einer Geschwindigkeit v um r vom Koordinatenursprung versetzt bewegt. Die Vektorrichtung des Drehimpulses ergibt sich hierbei aus der Drehrichtung; hierzu kann die „Rechte-Faust-Regel“ zu Hilfe genommen werden (siehe hierzu auch die Versuchsbeschreibung „Gauss-Kanone im selben Kapitel).

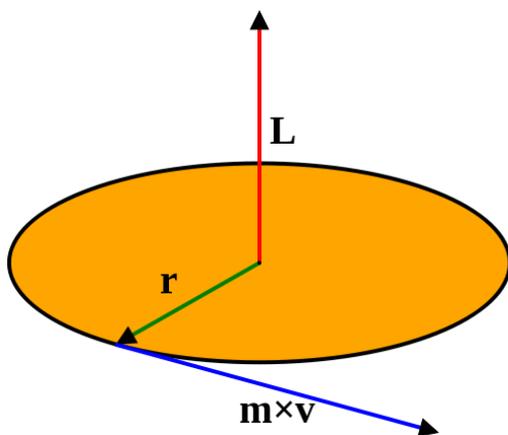


Abb. 80: Drehimpuls schematisch



Abb. 81: die Rechte-Faust-Regel

Der Drehimpuls schreibt sich zu

$$\vec{L} = m\vec{v} \times \vec{r} = \vec{p} * \vec{r} \quad (3.78)$$

und stellt somit das Produkt aus dem schon bekannten Impuls $\vec{p} = m * \vec{v}$ und dem Radius \vec{r} dar. Die Einheit hierfür:

$$[L] = \frac{\text{kgm}^2}{\text{s}}$$

Und weil der Drehimpuls eine *Erhaltungsgröße* ist, bleibt er in einem abgeschlossenen System konstant:

$$\vec{L}_{ges} = \sum m \vec{v}_i \times \vec{r}_i = \sum \vec{p}_i \times \vec{r}_i = \text{const.} \quad (3.79)$$

Genau dieses Gesetz der Drehimpulserhaltung ist besonders wichtig im Hinblick auf die Ergründung der Drehrichtungen der Spaghettiteile. Betrachten wir den Spaghetti als abgeschlossenes System. Der Drehimpuls zu einem Zeitpunkt $t = 0$ vor dem Bruch des Spaghetti ist

$$\vec{L} = 0.$$

Nun bricht der Spaghetti in vier Teile, von denen zwei nun, angeregt durch die freiwerdende Rückstellkraft des gespannten Spaghetti, in Drehbewegung geraten und davonfliegen. Beide drehen sich also, doch der Gesamtdrehimpuls muss weiterhin 0 bleiben!! Wie können die Spaghettistücke dieser Forderung genügen? Indem sie sich in *entgegengesetzte Richtungen* drehen!

Die Richtung des Drehimpulsvektors ergibt sich, wie oben erwähnt, aus der Drehrichtung des Körpers. Nun drehen in unserem System zwei Spaghettibruchstücke, das eine nach links, das andere nach rechts. Es ist anzunehmen, dass sich die Länge, Masse und Drehgeschwindigkeit der beiden Stücke so ausgleichen, dass der Gesamtdrehimpuls weiterhin

$$\vec{L}_{ges} = 0$$

bleibt!

Kommen wir zum zweiten Versuch, bei dem fünf Bruchstücke entstanden. Dies macht die Sache ein wenig komplizierter, jedoch können wir so eine weitere qualitative Beschreibung der Drehimpulserhaltung tätigen und ihr Prinzip besser kennenlernen.

Wir sehen also, wie der Spaghetti in fünf Stücke zerbricht. Zwei bleiben in den Händen des Experimentators, drei weitere fliegen weg und nehmen dabei eine Drehbewegung an, wie schon im vorigen Versuch. Wieder ist die Erhaltung des Drehimpulses gefordert, doch die einfache Symmetrie des vorigen Versuches (ein Stück dreht mit Drehimpuls \vec{L} in die eine Richtung, das andere mit Drehimpuls $-\vec{L}$ in die andere) ist nicht mehr gegeben. Stattdessen drehen nun, wie wir sehen, zwei Teile S1 und S2 nach links, eines, S3 nach rechts. Wir sehen, dass jenes nach rechts drehende Teil bei gleicher Größe bei weitem schneller dreht als die beiden nach links drehenden Teile.

Wir können davon ausgehen, dass der folgende Zusammenhang gilt:

$$|\vec{L}_{S1}| + |\vec{L}_{S2}| = |\vec{L}_{S3}| \quad (3.80)$$

und damit

$$|\vec{L}_{S1}| + |\vec{L}_{S2}| - |\vec{L}_{S3}| = 0 \quad (3.81)$$

Damit ist der Gesamtdrehimpuls wieder 0 und die Erhaltung des Drehimpulses gewährleistet.

Der „Becher-Kugel“-Versuch:

Versuchsaufbau:

Zwei Bretter, welche über ein Scharnier miteinander verbunden sind, bilden die Basis dieses Versuchs; mittels eines eingeklemmten Stabes wird ein Brett in der Schräge gehalten; darauf fixiert sind ein Becher (hier eine abgeschnittene PET-Flasche) sowie eine Schraube als Auflage für einen Golfball.



Abb. 82: Aufbau des „Becher-Kugel“-Versuchs

Durchführung:

Der stützende Stab wird rasch weggezogen, das gestützte Brett klappt nach unten.

Beobachtung:

Sobald der Stützstab fehlt, beginnt die Konstruktion zusammenzuklappen; Becher und Ball, zunächst in annähernd gleicher Höhe positioniert, beginnen, nach unten zu fallen. Der Becher ist hierbei am Brett fixiert, der Ball fällt frei nach unten. Erstaunlicherweise fällt der Ball IN den Becher, das bedeutet, obwohl beide gleich hoch und nebeneinander gelagert waren und beide gleichzeitig den Weg nach unten angetreten haben, war das Brett mit dem Becher schneller. Wie geht das?

Die Physik:

Zunächst werden wir feststellen, warum Ball und Becher überhaupt am selben Punkt am Boden ankommen; schließlich war ja zunächst der Ball NEBEN dem Becher angebracht.

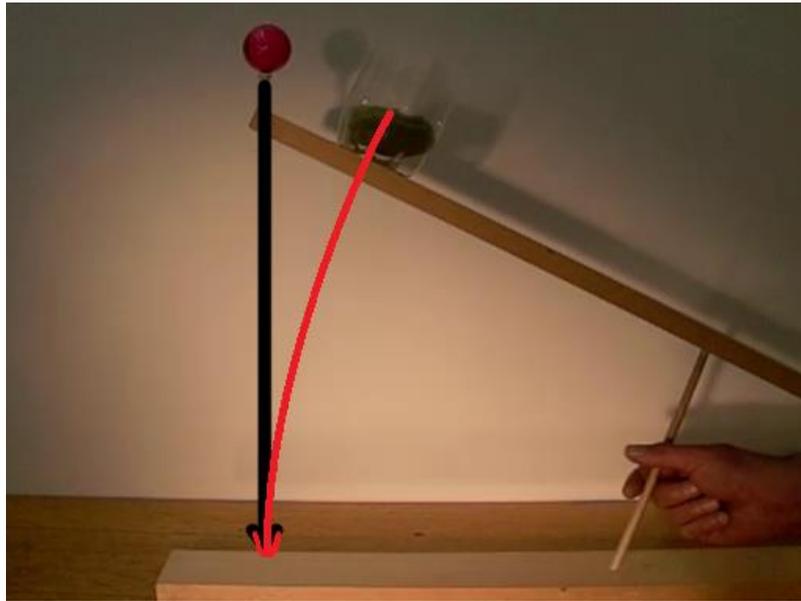


Abb. 83: Bahnen der beiden fallenden Körper

In Abb. 83 sehen wir die Fallbahnen des Balls und des Bechers. Der Ball fliegt, wie wir im Video auch sehen können, kerzengerade nach unten (schwarzer Pfeil), während die Bahn des Bechers gekrümmt ist – schließlich ist dieser auf dem Brett fixiert, welches wiederum über ein drehendes Scharnier mit dem Bodenbrett fixiert ist. Der Becher bewegt sich somit auf dem Ausschnitt einer Kreisbahn, mit der Entfernung vom Scharnier als Radius R und einer Winkelbeschleunigung $\ddot{\alpha}$. Beim Bau dieser Anordnung wurde darauf geachtet, dass der Aufprallpunkt des Balles (gerade Bahn) genau mit dem Aufprallpunkt des Bechers (gekrümmte Bahn) zusammentreffen.

Die Gesetze des Fallens wurden schon früh von Naturwissenschaftlern und Philosophen untersucht. So beschäftigten sich in der Antike Aristoteles und der römische Philosoph Lukrez mit dem Fallen; im 16. Jhdt. War es Galileo Galilei, der die fundamentale Erkenntnis festhielt, dass alle Körper, gleich welcher Masse oder Gestalt, im Vakuum gleich schnell zu Boden fallen müssen, was einige Jahrzehnte später von Robert Boyle experimentell bestätigt wurde.

Doch warum ist nun der Becher „schneller“ als der Ball? Die Starthöhe ist annähernd die gleiche, und wenn man vom Luftwiderstand, dessen Wirkung in diesem Fall vernachlässigbar ist, absieht, wird keiner der beiden Körper beim Fallen gestört.

Doch wie erwähnt unterscheiden sich die Bahnen des Balles und des Bechers: Der Ball fliegt gerade nach unten, die Bahn des Bechers ist gekrümmt. Hierin liegt der Schlüssel zur Lösung dieses Problems:

Beim Freien Fall wird der fallende Körper durch die Erdanziehungskraft \vec{F}_G in Richtung des Erdmittelpunkts beschleunigt. Das Prinzip von Actio est Reactio besagt auch, dass der fallende Körper und die Erde sich gleichermaßen anziehen, aufgrund ihrer großen Masse bewegt sich die Erde aber nicht messbar. Nun ist der „Angriffspunkt“ dieser Erdanziehungskraft der Schwerpunkt bzw. Massenmittelpunkt des fallenden Körpers; jener Punkt, an dem hinsichtlich der Masse in jede Richtung Symmetrie herrscht. Dieser Punkt befindet sich beim fallenden Brett irgendwo in der Mitte des Brettvolumens, ganz bestimmt nicht dort, wo der Becher befestigt ist. Für diesen Massenmittelpunkt beträgt also die Beschleunigung den bekannten Wert

$$\vec{a}_M = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Nun hat das Brett in der Mitte einen bestimmten Weg zum Boden zurückzulegen, der kürzer ist als der Weg, den das Ende des Bretts und damit der Becher zurückzulegen haben; beide müssen jedoch gleichzeitig am Boden ankommen, da ja das Brett starr und nicht verformbar ist und auch nicht auseinander bricht. Somit muss die Beschleunigung des Bretts am äußeren Rand höher sein als in der Mitte.

Anders gesagt:

Damit alle Punkte des Bretts gleichzeitig am Boden ankommen, muss die Winkelgeschwindigkeit überall gleich sein. Somit muss aber auch die Winkelbeschleunigung überall gleich sein, was aber zu verschiedenen Werten für die lineare Beschleunigung führt, da gilt:

$$\vec{a} = \vec{r} \cdot \ddot{\alpha} \quad (3.82)$$

Mit \vec{a} als des Werts der linearen Beschleunigung, \vec{r} als Abstand des Messpunkts vom Drehpunkt (Kreismittelpunkt) und $\ddot{\alpha}$ als der Winkelbeschleunigung.

Deshalb muss, damit das Verhältnis

$$\ddot{\alpha} = \frac{\vec{a}}{\vec{r}} \quad (3.83)$$

gleich bleibt, die Beschleunigung \vec{a} mit dem Radius \vec{r} „mitwachsen“, wodurch \vec{a} am Brettende größer als \vec{a}_g wird.

Tatsächlich funktioniert dieses Experiment nicht für jeden Anstellwinkel sondern nur für den Bereich $30^\circ - 45^\circ$. Bei anderen Anstellwinkeln trifft der Ball nicht in den Becher.

4. Experimente mit gestimmten Schlaginstrumenten unter Zuhilfenahme der High-Speed-Kamera

Einführung:

Etliche Versuche, welche ich in meiner Diplomarbeit durchgeführt und filmisch dokumentiert habe, stehen in Zusammenhang mit mechanischen Wellen bzw. der Wellenlehre insgesamt. Als Musiker interessiere ich mich für die Klangerzeugung verschiedener Instrumente und beschloss daher zu Beginn der Arbeit, Versuche mit Instrumenten durchzuführen und diese multimedial aufzubereiten. So versuchte ich, einige physikalische Aspekte der Klänge von Gitarre, Geige, Klavier, sowie verschiedenen Schlaginstrumenten darzustellen. In den einzelnen Videos sind schwingende Saiten sowie schwingende Membranophone und Idiophone (Schlagzeugbecken) zu sehen. Die physikalischen Hintergründe der Klangerzeugung einiger Instrumente wurden in dieser Arbeit im Kapitel „Experimente unter der Zeitlupe“ genauer erläutert. Weitere Instrumente, welche noch nicht bearbeitet wurden, werden in diesem Kapitel untersucht.

Es sind dies:

- Die Pauke
- Das Vibraphon
- Das Marimbaphon
- Die Steel-Drum

Diese Instrumente gehören zu den Instrumentengattungen der Membranophone (Pauke) und der Idiophone (Vibraphon, Marimbaphon, Steel-Drum). Sie alle haben ein gemeinsames Merkmal: eine definierte Stimmung. Jedes dieser Instrumente ist imstande, Klänge mit definierten Tonhöhen zu erzeugen, anders als dies z.B. beim Schlagzeugbecken der Fall ist. So zeigt sich der Schlag auf ein solches Schlagzeugbecken im Frequenzspektrum als akustisches Ereignis, bei welchem sehr viele Frequenzen, welche in keinem erkennbaren Zusammenhang zueinander stehen, auftreten. Dies bezeichnet man in der Sprache der Akustik als „Geräusch“.

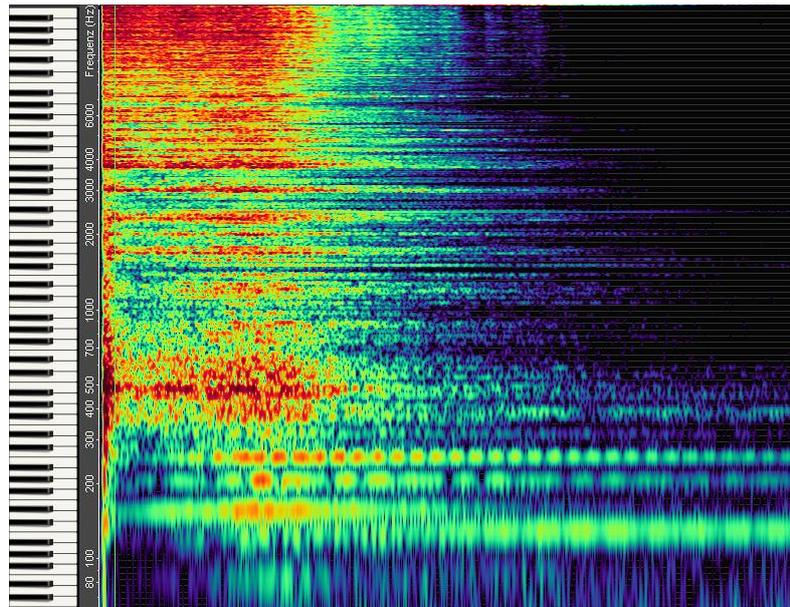


Abb. 84: Frequenzspektrum eines angeschlagenen „Crash“-Beckens

In der Abb. 84 ist zu erkennen, dass die Obertonstruktur des „Crash“-Beckens recht unregelmäßig und dicht ist – besonders auffällig ist die Häufung der klingenden Frequenzen im oberen Frequenzbereich, ab 6000 Hz aufwärts.

Ganz anders verhält es sich bei den hier bearbeiteten Instrumenten; Sie dienen der Erzeugung von „Klängen“. Als „Klang“ bezeichnet man in der Akustik ein Ereignis, bei welchem eine Reihe von Frequenzen, welche in bestimmten ganzzahligen Zahlenverhältnissen zueinanderstehen, gleichzeitig erklingen, ein Klang setzt sich also aus mehreren „Tönen“ zusammen. Im Frequenzspektrum zeigt sich dies durch einen „Grundton“ (die Grundfrequenz, welche meist auch die musikalische Tonhöhe definiert) und eine regelmäßige Abfolge von „Obertönen“, welche sich aus ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz bilden. Hieraus können wir schon ersehen, dass Töne aus einer definierten Frequenz bestehen und mehrere Töne die Unterstruktur eines Klanges bilden. Hierin liegt einer der Unterschiede der Diktionen der Musiktheorie und der Akustik: in der Musik bezeichnet man als „Ton“ eine von einem Instrument gespielte Note. Akustisch gesehen erzeugt jedoch praktisch kein Instrument Töne, sondern vielmehr Klänge; Ausnahmen bilden hier verschiedene elektronische Instrumente, bei welchen man tatsächlich Töne generieren kann, oder Stimmgabeln, deren Klang einer sinusförmigen Schallwelle sehr nahekommt. Nun ist die Verwechslungsgefahr von „Ton“, „Klang“ usw. recht groß, man muss also darauf achten, die richtige Bezeichnung für die jeweiligen akustischen Phänomene zu benutzen. Im Folgenden wird die akustische Diktion verwendet, ein Ton bezeichnet also eine sinusförmige Schallwelle, ein Klang ein Zusammenklingen von Grundton und Obertönen eines schwingenden Systems.

Bei der Untersuchung der Instrumente wurden verschiedene Geräte zur Audio- und Videoaufnahme eingesetzt, darunter auch die in dieser Arbeit mehrfach erwähnte Kurzzeitkamera Casio Exilim, weiters ein hochwertiges digitales Aufnahmegerät der Marke Roland/Edirol zur Aufzeichnung und spektralen Auswertung der verschiedenen Instrumentenklänge. Die Darstellung von Instrumentenspektren gelingt hervorragend mit der „Overtone“-Software der Firma Sygyt. Sämtliche Spektralgrafiken in diesem Kapitel wurden mit dieser Software erzeugt. Ein weiteres hilfreiches Programm, welches verwendet wurde, ist die Video-Analyse-Software „Measure Dynamics“. Referenzen zu all diesen verwendeten Geräten und Computerprogrammen befinden sich im Anhang.

Die verschiedenen Instrumente wurden auf verschiedene Weise untersucht bzw. wurden an ihnen verschiedene Versuche durchgeführt:

- Die Untersuchung von Frequenzspektren mittels spektraler Auswertung von Audioaufnahmen
- Die Untersuchung der Schwingungen mittels der Aufnahmen der Kurzzeitkamera
- Vergleich der ermittelten Schwingungen mit dem Frequenzspektrum
- Die Anregung von Resonanz bei der Pauke und der Steel-Drum mittels eines Frequenzgenerators

Im Folgenden werden die erwähnten Versuche genau beschrieben. Hierbei wird jedes Instrument einzeln behandelt. Bei der Ausarbeitung der Versuche unterstützte mich Univ.-Prof. Leopold Mathelitsch, er versorgte mich auch mit großen Mengen an Fachartikeln und sonstiger Literatur. Univ.-Prof. Dr. Gernot Pottlacher, welcher diese Arbeit insgesamt betreut, sowie Dr. Roland Lammegger unterstützten mich mit den benötigten Gerätschaften. Bei ihnen allen möchte ich mich an dieser Stelle herzlich bedanken.

Die Resonanz der Pauke:

Die Pauke gehört zu der Instrumentengattung der Membranophone. Membranophone besitzen zur Klangerzeugung eine dünne Haut (Membran), z.B. aus Tierhaut oder Kunststoff, welche meist über einen Rahmen gespannt wird. Im Falle der Pauke ist dieser Rahmen ein Kessel aus Kupfer. Die Membran ist in ihrer Spannung mittels rund um den Rahmen angebrachter Schrauben oder mittels eines Fußpedals justierbar. So lässt sich die Pauke auf eine gewünschte Tonhöhe stimmen. Gängig sind fünf verschiedene Paukengrößen, welche verschiedene Tonumfänge besitzen.

In dieser Versuchsreihe wurde das Fell einer Pauke mittels eines an einen Frequenzgenerator angeschlossenen Lautsprechers in Resonanz gebracht. Wie dies von statten ging, wird im Folgenden erläutert.

Aufbau:

Zur Anregung des Fells wurden die folgenden Geräte verwendet:

- Ein Gwinstek SFG 2107-Frequenzgenerator
- Eine KODA-Verstärkerendstufe (150 W)
- Ein Breitband-Laborlautsprecher der Firma Leybold



Abb. 85: Die zur Anregung verwendeten Geräte

Der Lautsprecher wird mit einem Stativ so fixiert, dass seine Abstrahlfläche parallel zum Fell der Pauke liegt. Auf das Fell der Pauke wird ein wenig Meersand gestreut, dieser wird gleichmäßig über das Paukenfell verteilt.



Abb. 86: Anordnung des Lautsprechers und präpariertes Paukenfell

Es ist darauf zu achten, den Lautsprecher nicht genau über der Mitte des Paukenfells zu platzieren. Wird das Fell in diesem Bereich angeregt, so schwingt das Fell in einer Weise, welche nicht dem typischen Paukenklang entspricht; dies bestätigt sich, wenn man mit einem Paukenschlägel in die Mitte der Fellfläche schlägt – der Klang ist besonders dumpf und kurz, während ein eher im Randbereich gesetzter Schlag den typischen obertonreichen und lang anhaltenden Paukenklang mit sich bringt. Deshalb schlagen auch Paukisten das Fell immer eher im Randbereich an.

Durchführung:

Zunächst wird der Klang der Pauke mit einem digitalen Aufnahmegerät aufgenommen. Die Aufnahme wird mittels einer Analysesoftware (hier das erwähnte „Overtone“-Programm) ausgewertet; im Frequenzspektrum können wir Grundton und Obertonstruktur gut erkennen; so konnte z.B. für die Grundfrequenz ein Wert von ca. 116 Hz ermittelt werden. Dies entspricht ungefähr dem Ton A[#] bzw. B. Die so ermittelten Frequenzen werden wir nacheinander am Frequenzgenerator einstellen, zunächst die Grundfrequenz von 116 Hz. Der Lautsprecher wird über dem Paukenfell platziert und in Betrieb genommen. Mittels eines Drehreglers am Frequenzgenerator kann die Frequenz bis auf den Bereich der ersten Nachkommastelle feinjustiert werden. Das Erreichen der Resonanzfrequenz lässt sich akustisch gut feststellen – das Paukenfell beginnt zu schwingen und der Paukenkessel als Resonanzkörper reagiert; deshalb scheint der Ton des Lautsprechers mit einem Mal lauter zu erklingen als abseits der Resonanzfrequenz.

(Anm.: Zur Ermittlung des Grundtons „verwendete“ ich auch einmal einen Kollegen, welcher mit einem absoluten Gehör ausgestattet ist. Er teilte mir den Ton der Pauke mit, ich verglich

diese Information mit einer Frequenztafel. Die Benutzung einer Analysesoftware bringt zwar genauere Ergebnisse mit sich, diese Methode ist jedoch recht ebenfalls recht interessant.).

Beobachtung:

Betrachten wir zunächst das Frequenzspektrum der Pauke, welches mit der oben erwähnten Software analysiert wurde:

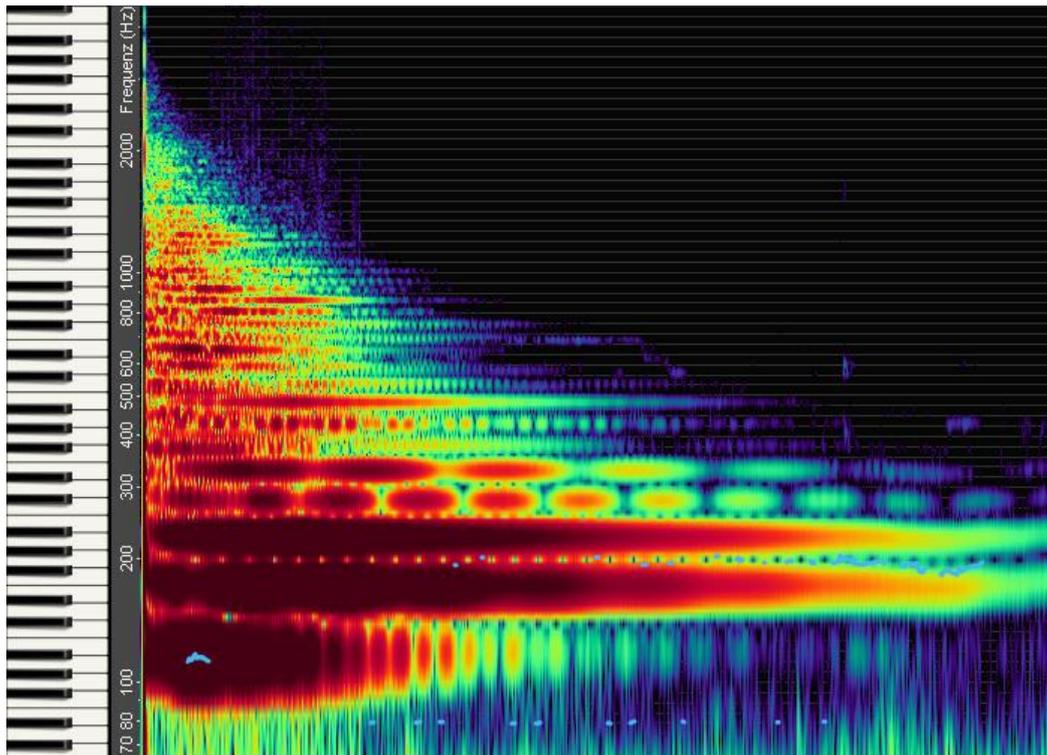


Abb. 87: Frequenzspektrum/Obertonanalyse einer Pauke

Das Spektrum der Pauke unterscheidet sich stark von jenem des Schlagzeugbeckens. So ist hier eine differenzierte Obertonstruktur mit stark ausgeprägtem Grundton und Obertönen erkennbar. Deutlich zu sehen sind die dunkelrot dargestellten Frequenzen des Grundtones (116 Hz) sowie der Quint (177 Hz) und der Oktave (233 Hz) als erste Obertöne; diese wurden auch bei den Resonanzversuchen verwendet.

Die Resonanz der Pauke wurde sowohl mit einer herkömmlichen Digitalkamera als auch mit der High-Speed-Kamera der TU Graz aufgezeichnet. Mit der Digitalkamera wurde der ganze Zeitraum, während welchem sich die Pauke in Resonanz befand, aufgezeichnet, mit der High-Speed-Kamera wurden Nahaufnahmen der Sandkörner auf dem Paukenfell angefertigt. Diese Sandkörner spielen eine wesentliche Rolle bei der Durchführung und Auswertung des Versuchs. So können wir anhand des Hüpfens der Sandkörner, welches besonders im Zeitlupenvideo gut sichtbar wird, erkennen, wann das Paukenfell zu schwingen beginnt, weiters

lässt sich bei längerer Resonanzdauer feststellen, dass sich die Sandkörner an bestimmten Stellen am Paukenfell sammeln. Die so entstehenden Bilder variieren je nach Anregefrequenz:

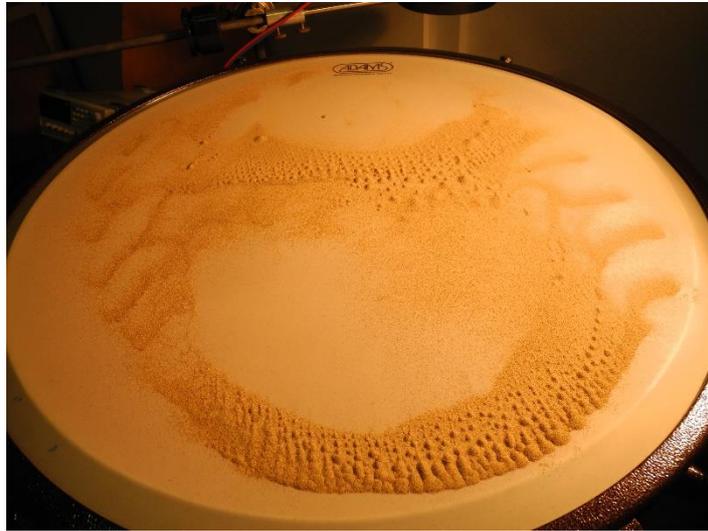


Abb. 88: Resonanz bei 116,6 Hz



Abb. 89: Resonanz bei 177 Hz



Abb. 90: Resonanz bei 233 Hz

Zu erkennen ist, dass sich die Sandkörner bei verschiedenen Anregefrequenzen zu verschiedenen Stellen am Paukenfell hinbewegen. So finden wir bei einer Anregung mit 116,6 Hz zwei größere, leere Flächen vor, bei 177 Hz sehen wir eine feinere Aufteilungen mit mehreren kleineren freien Flächen, und bei 233 Hz können wir, obwohl schwer erkennbar, eine ebenso feine Aufteilung erkennen. In den Randbereichen häufen sich die Sandkörner zu kleinen Dünen auf, was eine interessante, regelmäßige Struktur mit sich bringt.



Abb. 91: Bei der Resonanz entstandene Häufchen bzw. Dünen

Jene Umstände, welche der Entstehung dieser „Sandbilder“ zugrunde liegen, werden im Folgenden beschrieben.

Die Physik:

Die Anregung der Pauke mittels eines auf eine Resonanzfrequenz eingestellten Frequenzgenerators unterscheidet sich wesentlich von der üblichen Anregung mittels eines Paukenschlägels. So schwingt das Fell beim Schlag mit einem Schlägel so, dass der charakteristische Paukenklang (Grundton + Obertöne) hörbar wird. Auch ist die Schwingungsdauer relativ kurz. Bei Anregung des Paukenfells mittels einer Resonanzfrequenz kann man beliebig lange Schwingungsdauern erreichen – eben so lange, wie der Lautsprecher, der die anregende Frequenz aussendet, in Betrieb ist. Außerdem schwingt das Paukenfell nun nicht in jener Form, welche den bekannten Paukenklang mit sich bringt, sondern in einer Weise, welche speziell auf die jeweilige Resonanzfrequenz abgestimmt ist. So wie sich der Klang der Pauke aus Grundton und Obertönen zusammensetzt, entspricht nämlich jeder dieser Frequenzen ein charakteristisches Schwingungsverhalten des Fells. Die Überlagerung dieser verschiedenen, zu den einzelnen Teiltönen gehörigen Schwingungsformen, welche man „Moden“ nennt, ergibt dann jenes Schwingungsverhalten, welches den charakteristischen Paukenklang erzeugt. Bei der Ermittlung dieser Moden greift man auf ein vereinfachtes Modell einer kreisrunden, zweidimensionalen Membran zurück.

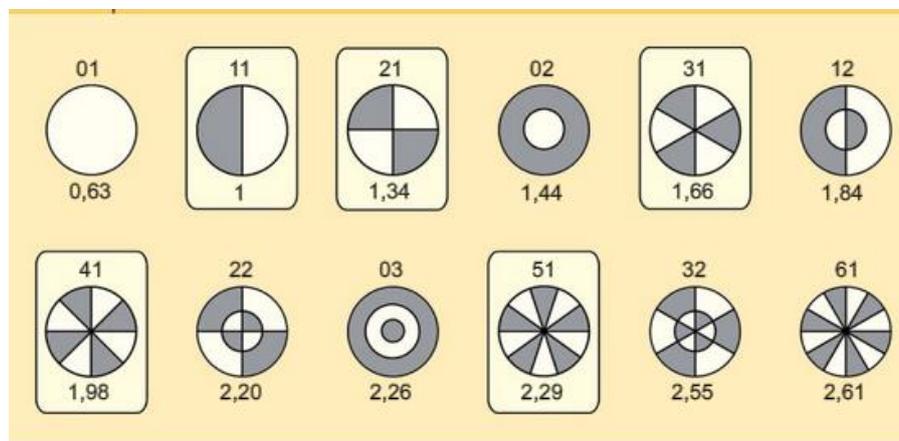


Abb. 92: Die Schwingungsmoden einer idealen kreisförmigen Membran

In Abb. 92 sind die untersten Moden der Schwingungen einer idealen kreisförmigen Membran zu sehen. Bemerkenswert ist, dass die Schwingungsmoden einer idealen Membran mit ihren dazugehörigen Frequenzverhältnissen keinen harmonischen Klang ergeben würden; die Pauke als reales Instrument mit „nichtidealer“ Membran erzeugt jedoch, wie wir wissen, einen harmonischen Klangeindruck, welcher sich folglich durch äußere Einflüsse ergeben muss.

Von großer Bedeutung ist hier die Luft über dem Paukenfell; Deren Trägheit bewirkt eine Verschiebung der Frequenzverhältnisse. So verschieben sich die Frequenzverhältnisse von 1 : 1,34 : 1,66 zu 1 : 1,50 : 1,97. [11]

Diese Verhältnisse entsprechen recht genau den musikalischen Intervallen Prim : Quint : Oktav, welche auch „reine“ Intervalle genannt werden. Ebendiese Intervalle wurden mit den weiter unten erwähnten Frequenzen untersucht. Die Quint steht, wie aus dem obenstehenden Verhältnis ersichtlich wird, zum Grundton in einem Frequenzverhältnis von 3:2, die Oktave steht zum Grundton in einem Frequenzverhältnis von 1:2. Die untersuchten Frequenzen sind in der nachfolgenden Tabelle verzeichnet.

Frequenz	Funktion im Spektrum
116,6 Hz	Grundfrequenz / tiefste untersuchte Frequenz
177 Hz	Quint
233 Hz	Oktav

Bei bekannter Grundfrequenz kann man leicht die Frequenzen von Quint und Oktav überprüfen bzw. ermitteln.

Nehmen wir die Grundfrequenz und multiplizieren wir sie mit 3 / 2:

$$116,6 \text{ Hz} \cdot \frac{3}{2} = \sim 175 \text{ Hz} \quad 4.1$$

Wir erreichten Resonanz bei einer Frequenz von 177 Hz, was annähernd dem errechneten Wert von 175 Hz entspricht. Nun überprüfen wir die zweite im Versuch eingestellte Frequenz:

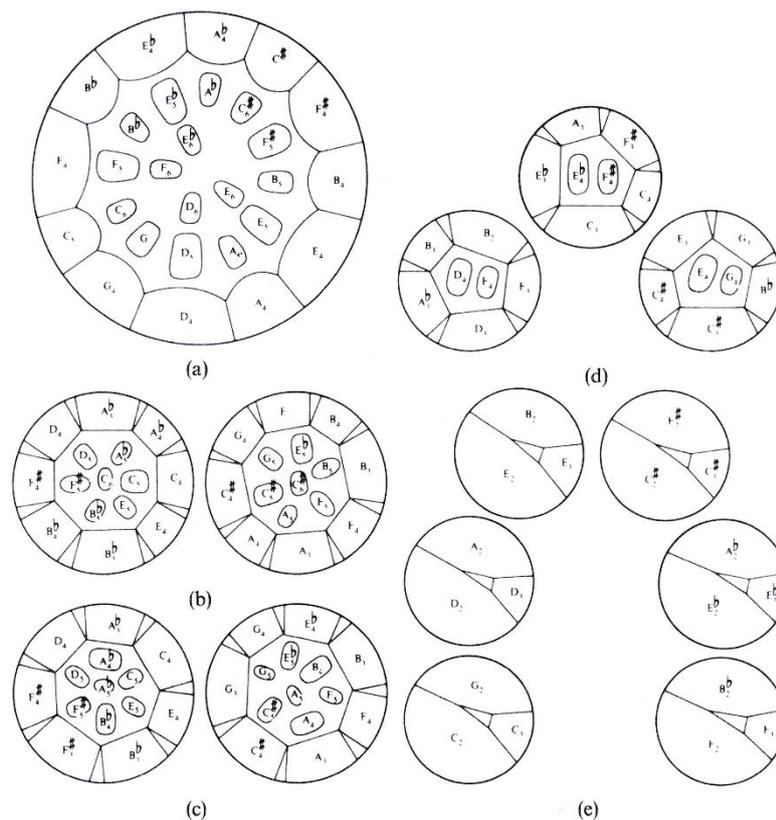
$$116,6 \text{ Hz} \cdot 2 = 233,2 \text{ Hz} \quad 4.2$$

Die errechnete Frequenz entspricht genau jener Frequenz, bei der Resonanz erreicht wurde. Wir haben nun also Resonanz bei verschiedenen Frequenzen erreicht und die Frequenzen ihren jeweiligen Funktionen im Frequenzspektrum zugeordnet. Der Vergleich der bei der Resonanz entstandenen Sandmuster mit den Moden aus der Grafik ergibt, dass die Anregung mit einer Resonanzfrequenz tatsächlich deren charakteristisches Modenbild zutage fördert, welches allerdings durch den Lautsprecher als anregendes Element ein wenig verfälscht wird – jener

Bereich der Pauke, der direkt unter dem Lautsprecher liegt, beginnt in jedem Fall zu schwingen, sodass die Sandkörner sich aus diesem Bereich fortbewegen.

Die Resonanz der Steel-Drum:

Steel Drums stammen aus dem karibischen Raum und gehören zur Instrumentengruppe der Idiophone (Selbstklinger). Traditionell werden Steel-Drums aus den Deckeln alter Ölfässer hergestellt. Hierzu werden einzelne Segmente des Deckels mit einem Hammer so bearbeitet, dass sie beim Schlag mit einem Schlägel einen bestimmten Klang von sich geben. Verschiedene Segmente lassen sich hierbei so stimmen, dass Steeldrums einen bestimmten Tonumfang besitzen, der sich je nach Größe und Bauart von Steel-Drum zu Steel-Drum unterscheiden kann.



der Tonumfang verschieden ist. So besitzt die Lead Pan den größten Tonumfang, während eine einzelne Bass Drum nur drei verschiedene Klangfelder aufweist, welche in fixen harmonischen Verhältnissen zueinander stehen, nämlich Prim – Quint – Oktav.

Je nach Qualität können Steel-Drums sehr rein klingen (harmonische Obertonstruktur), bei eher minderer Qualität kann der Klang der Steel-Drum ein wenig unrein erscheinen. Dies ist bei der vorliegenden Steel-Drum der Fall. Diese stammt aus einem Dorf in der Nähe des Grand Anse Beach von der Karibikinsel Grenada, wo ein Mann in einem an sein Haus angrenzenden Holzschuppen Steel-Drums aus Ölfässern produziert. Die Steel-Drum besitzt einen Tonumfang von 12 Halbtönen, also einer Oktave. Diese sind mit den Notennamen C bis c beschriftet – die Spektralanalyse zeigt, dass diese Notennamen nicht genau auf die zu den Noten gehörigen Frequenzen zutreffen; Jenes Klangfeld, welches mit „C“ beschriftet ist, geriet bei einer Anregungsfrequenz von 368 Hz in Resonanz; dies entspricht einem F[#], welches zum C im Intervall einer verminderten Quint steht – also genau in der Mitte zwischen zwei Cs innerhalb der Tonreihe.

Im folgenden Versuch wird eine Steel-Drum auf die gleiche Weise untersucht wie die Pauke zuvor:

1. Audioaufnahme von einem der Anschlagfelder
2. Auswertung der Aufnahme mit einer Software zur Spektralanalyse
3. Ermittlung der Resonanzfrequenzen
4. Anregung des betreffenden Tonfeldes mit den ermittelten Resonanzfrequenzen

Ein großer Unterschied zum Paukenversuch besteht darin, dass nun eben ein einzelnes Tonfeld auf der Oberfläche der Steel Drum untersucht wird, und nicht, wie dies bei der Pauke der Fall war, die ganze Oberfläche des Instruments.

Aufbau:

Es wurden dieselben Geräte verwendet wie zuvor beim Pauken-Versuch. Diese wurden folgendermaßen platziert.

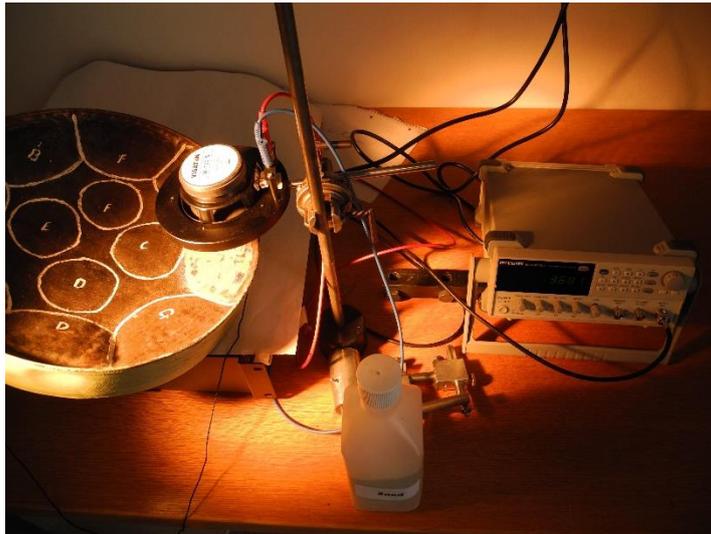


Abb. 94: Versuchsanordnung des Steel-Drum-Versuches

Links in der Abb. 94 sehen wir die Steel-Drum. Das Tonfeld „C“ ist mit Sand bestreut, darüber ist der Lautsprecher platziert. Dieser wird zur Anregung noch weiter abgesenkt und nimmt dann einen recht kleinen Abstand zum Tonfeld ein. Der Lautsprecher ist verbunden mit der Verstärkerendstufe, welche das aus dem Frequenzgenerator stammende Signal verstärkt.

Durchführung:

Der Ablauf des Versuchs ähnelt dem Ablauf des zuvor gezeigten Versuchs. Zunächst wird eine Audioaufnahme eines Schlags auf das gewünschte Tonfeld „C“ angefertigt. Diese wird mit der Overtone-Software analysiert. Das Frequenzspektrum des Steel-Drum-C lässt einen Grundton und eine gewisse Obertonstruktur erkennen, jedoch weniger ausgeprägt als bei der Pauke – zudem mischen sich harmoniefremde Frequenzen ins Spektrum, ein Umstand, der auch akustisch auffällt: die Steel-Drum klingt etwas unrein, auch ist die Dauer des Nachklingens (Sustain) recht kurz.

Aus dem Frequenzspektrum wurde zunächst die Grundfrequenz 368 Hz ermittelt. Diese wurde am Frequenzgenerator eingestellt. Wie zuvor bei der Pauke wurde ein wenig Sand auf das betreffende Tonfeld gestreut.

Zur Dokumentation des Versuchs wurde eine Digitalkamera verwendet. Das Erreichen der Resonanzfrequenz wird durch den Beginn der Bewegung der Sandkörner auf dem Tonfeld angezeigt.

Beobachtung:

Betrachten wir zunächst wieder das Frequenzspektrum der Steel-Drum, um die ermittelte Resonanzfrequenz bestätigen zu können.

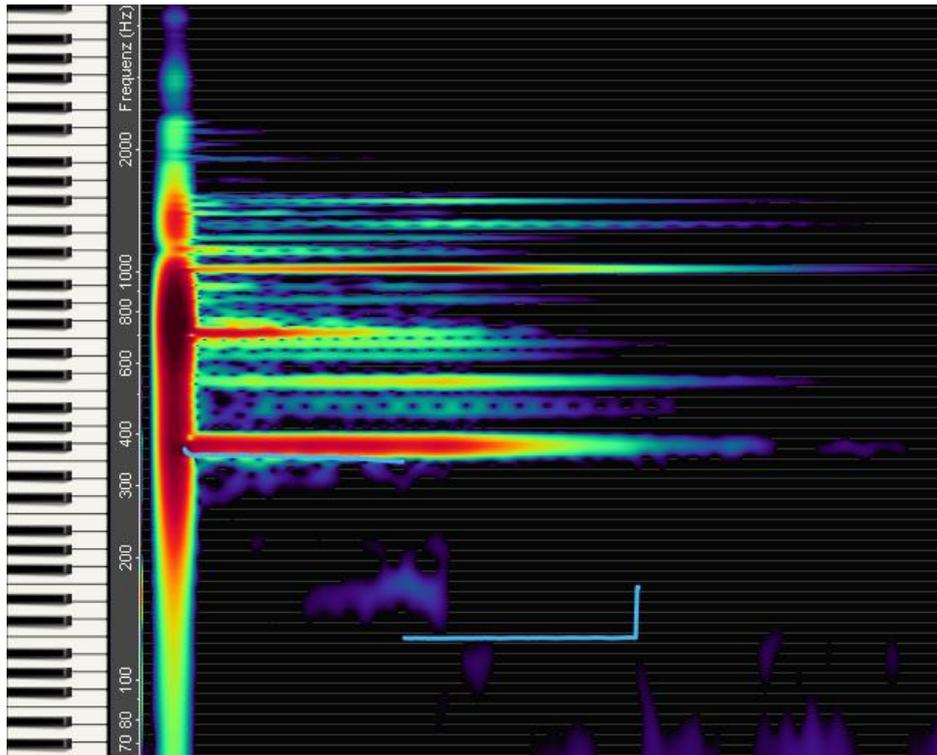


Abb. 95: Frequenzspektrum einer Steel-Drum

Das Spektrum in Abb. 95 zeigt die Obertonstruktur der Steel-Drum. Besonders ausgeprägt zeigt sich der Anschlag, dessen über einen kurzen Zeitraum erklingendes Geräusch Frequenzen von ca. 200 Hz bis 1500 Hz enthält. Erst sobald dieses Geräusch abgeklungen ist, zeigt sich die Obertonstruktur der Steel-Drum. Stark ausgeprägt ist die Grundfrequenz von 368 Hz. Diese Frequenz entspricht der musikalischen Tonhöhe eines F^\sharp , die Beschriftung des Tonfeldes mit „C“ ist also nicht richtig. Eher schwach ausgeprägt können wir im Spektrum die Quint erkennen, wieder stärker ausgeprägt zeigt sich darüber die Oktav, zwischen 600 und 800 Hz. Dazwischen sind einige schwächer ausgeprägte Obertöne zu sehen, welche sich im etwas unrein erscheinenden Klang der verwendeten Steel-Drum äußern.

Sobald der Lautsprecher bei der aus dem Frequenzspektrum ermittelten Frequenz von 368 Hz in Betrieb genommen wird, beginnen sich die Sandkörner auf dem Tonfeld, zu bewegen. Wie zuvor bei der Pauke ist die Bewegung der Resonanz des Tonfeldes geschuldet – bestimmte Bereiche des Tonfeldes schwingen stärker, andere Bereiche schwingen weniger. Die Sandkörner bewegen sich weg von den Bereichen mit starker Schwingung hin zu den Bereichen, welche nicht schwingen – den Knotenpunkten der durch die Resonanz verursachten Schwingung. Dies geschieht analog zu zahlreichen im Rahmen dieser Diplomarbeit beschriebenen Versuchen: den Chladni'schen Klangfiguren, der Kundt'schen Röhre und der oben beschriebenen Pauke. Allerdings läuft dieser Prozess nicht so reibungslos ab wie bei der

Pauke; Das Tonfeld der Steeldrum ist ein wenig uneben, was auf die manuelle Herstellung aus einem alten Ölfass zurückzuführen ist.

Diese Grundtonmode ist die einzige Mode, die auf die Anregung reagiert hat. Die Frequenzen der Obertöne konnten nur recht ungenau ermittelt werden, da das ermittelte Spektrum der Steeldrum recht unregelmäßig ist.

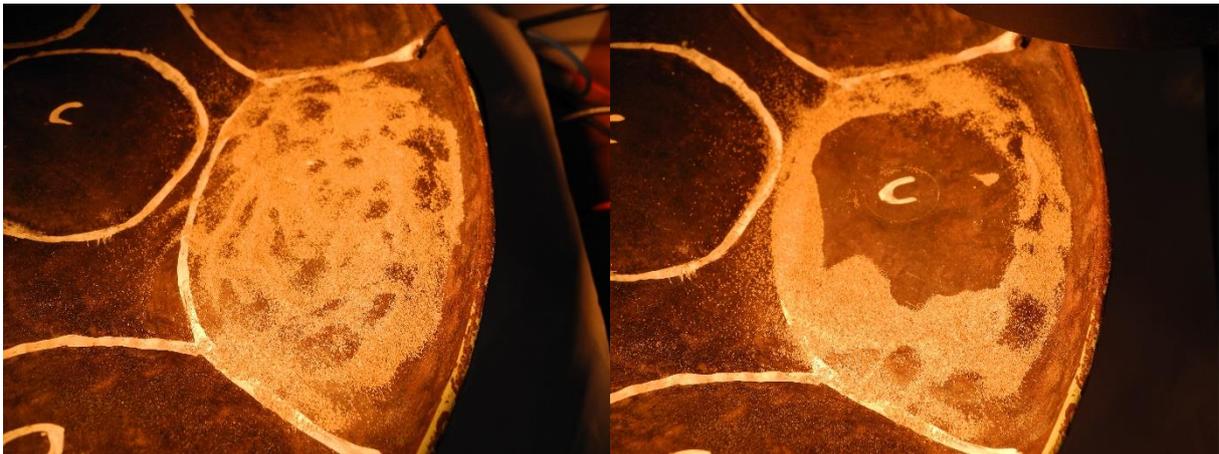


Abb. 96: Tonfeld vor der Anregung

Abb. 97: Tonfeld nach der Anregung

Die Physik:

Der Klang von Steel-Drums ist ein Resultat verschiedener zusammenhängender Faktoren, welche bei der Produktion berücksichtigt werden. Diese geht folgendermaßen vonstatten: Zunächst wird der Boden eines Ölfasses nach innen eingedellt. Auf der so entstehenden konkaven Fläche werden die gewünschten Tonfelder eingezeichnet und dann mit einem Hammer zu konvexen Ellipsoiden nach außen getrieben. Diese Tonfelder werden durch eine Rille, welche mit einem Meißel in das Metall getrieben wird, begrenzt. Diese Rille bildet nicht nur eine sichtbare Begrenzung des Tonfeldes sondern soll auch, ähnlich dem Rahmen einer Trommemembran, eine äußere Begrenzung der Membran bilden, sodass die Wirkung der Anschläge örtlich begrenzt bleibt und keine unerwünschten Resonanzen anderswo auf der Spielfläche bewirkt. Die Membrane von Trommeln sind am Rahmen fixiert, jeder Auflagepunkt bildet für die Membranwellen, wie wir wissen, Knotenpunkte. Ganz ähnlich verhält es sich hier mit der Rille.

Die Stimmung der einzelnen Tonfelder ist ein kompliziertes Verfahren, nicht zuletzt deshalb, weil die einzelnen Tonfelder trotz der Entkopplung durch die Rillen miteinander kommunizieren und auf Veränderungen reagieren. Mit Hammerschlägen kann man die Stimmung von Grund- und Oberschwingungen variieren, um den Klang so rein wie möglich

erscheinen zu lassen. Geübte Steel-Drum-Hersteller stimmen zumindest Grundfrequenz und ersten Oberton aufeinander ein, manchmal auch den zweiten und dritten Oberton, besonders bei tiefen Grundfrequenzen. Hierbei werden Hammerschläge von oben auf die Mitte des Tonfelds gesetzt, um die Grundfrequenz zu verringern; Hammerschläge von unten auf die Mitte oder von oben auf die Seite erhöhen die Grundfrequenz. Das Stimmen der Obertöne dagegen funktioniert durch die Bearbeitung der Knotenlinien der dazugehörigen Mode und ist deshalb um einiges komplizierter. Bei der Stimmung eines Tonfeldes bleibt auch immer ein gewisser Einfluss der anderen Tonfelder erhalten. So setzt sich das Frequenzspektrum, welches aus einem Schlag auf ein Tonfeld resultiert, aus verschiedenen Obertönen zusammen, welche den folgenden Ursprung haben können:

1. Die Obertöne des angeschlagenen Tonfeldes
2. Frequenzen aus dem Spektrum benachbarter Tonfelder, welche zur angeschlagenen Note harmonisch „dazupassen“
3. Nichtlineare Bewegung des Tonfeldes, welches mit seiner Grundfrequenz schwingt

Wie auch bei anderen Membranophonen und Idiophonen steht die Entwicklung von Obertönen bei der Steel-Drum in engem Zusammenhang mit der Ausbildung von Moden, also bestimmten Schwingungsmustern, welche sich einem bestimmten Oberton zuordnen lassen. Jedoch ist zu beachten, dass die Beschaffenheit der Tonfelder der Steel-Drum von der Beschaffenheit einer idealen Membran abweicht. Abb. 98 zeigt die Schwingungsmoden dreier verschiedener angeschlagener B^b -Noten. Die verschiedenen Tonfelder auf der Steel-Drum besitzen je nach Tonhöhe verschiedene Formen.

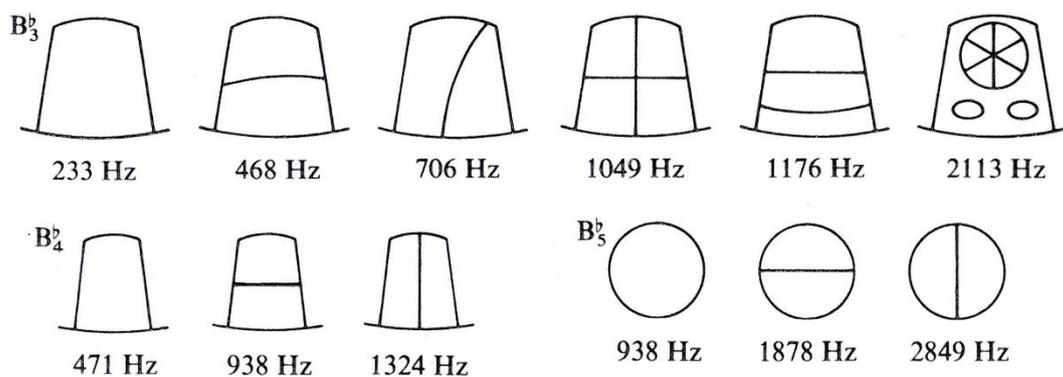


Abb. 98: Schwingungsmoden dreier verschiedener B^b -Noten

Wie in Abb. 98 zu sehen, besitzen die tieferen B^b 's Trapezform, während das höchste durch ein rundes Tonfeld zum Klingen gebracht wird. Interessant ist die Lage der Knotenlinien je

nach Oberton, da, wie erwähnt, Obertöne durch die Bearbeitung des Metalls auf oder nahe der Knotenlinien gestimmt werden können.

Marimbaphon und Vibraphon im Zeitlupenvideo:

In der im Folgenden beschriebenen Versuchsreihe geht es um schwingende Klangstäbe verschiedenen Materials. So wurden die Klangstäbe eines Marimbaphons, welche aus Holz bestehen, und eines Vibraphons, welche aus Metall bestehen, mit der in dieser Arbeit verwendeten High-Speed-Kamera gefilmt und das solcherart erzeugte Filmmaterial ausgewertet. Auch wurden wieder Audioaufnahmen vom Klang der angeschlagenen Klangstäbe angefertigt und mit der weiter oben erwähnten Analysesoftware hinsichtlich ihres Spektrums ausgewertet. Bei Pauke und Steel-Drum stand die Anregung von Resonanz mittels der bekannten Grundfrequenzen und Obertöne im Mittelpunkt; bei Marimbaphon und Vibraphon werden nun die Schwingungen der Klangstäbe im Film analysiert und überprüft, welche Funktion die sichtbaren Schwingungen im Frequenzspektrum einnehmen. Zunächst erfolgt die Analyse des Marimbaphons.

Aufbau:

Die High-Speed-Kamera wird auf den zu filmenden Klangstab des Marimbaphons gerichtet. Außerdem wird das digitale Aufnahmegerät vorbereitet, damit eine Audioaufnahme des Marimbaphonklanges erzeugt werden kann.

Durchführung:

Der gewünschte Klangstab wird mittels eines geeigneten Schlägels angeschlagen. Die Kamera filmt, das Aufnahmegerät ist aktiviert.

Beobachtung:

Betrachten wir zunächst das aus der Audioaufnahme ermittelte Frequenzspektrum:

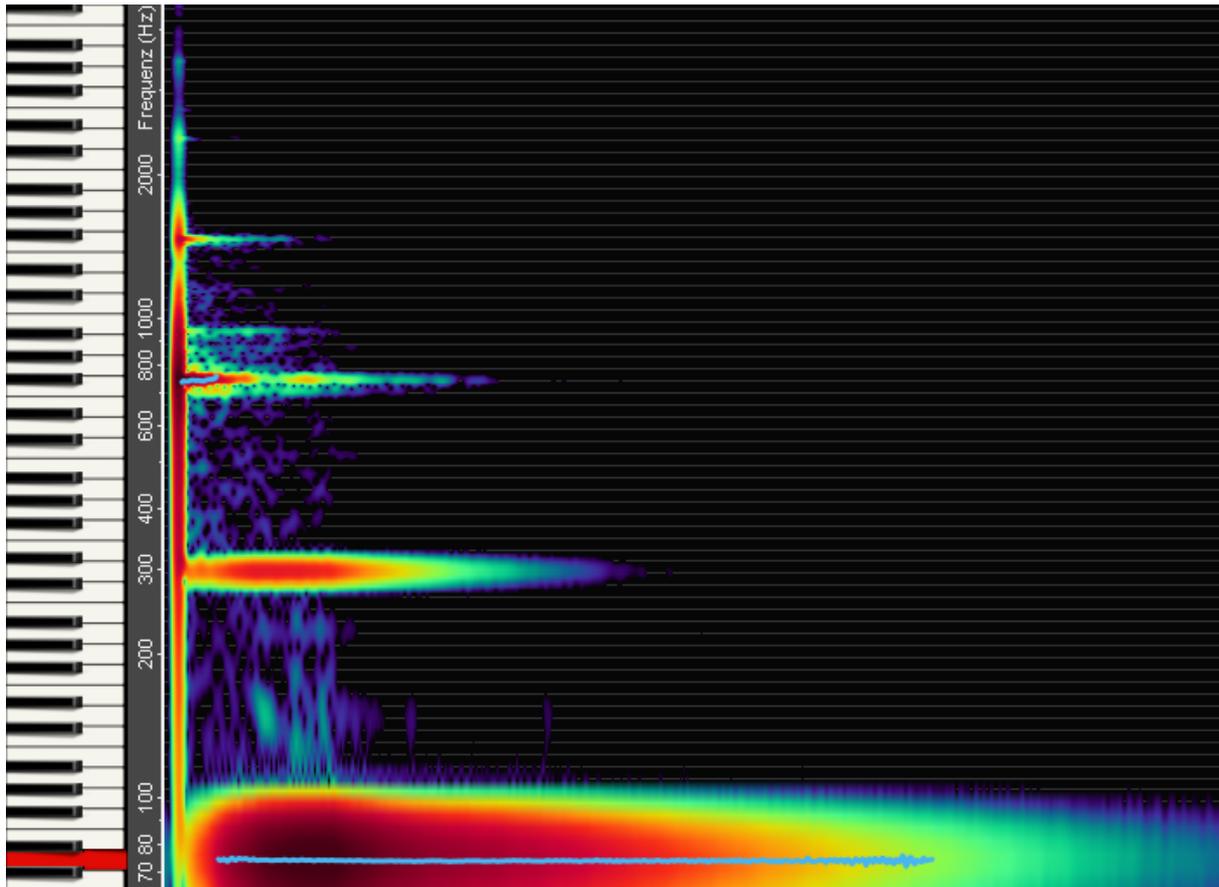


Abb. 99: Frequenzspektrum eines Marimbaphonstabes der Tonhöhe D

Im in Abb. 99 gezeigten Spektrum ist zu erkennen, dass schon der Anschlag selbst ein kurzes Klangereignis darstellt, welches seine stärkste Ausprägung bei Frequenzen zwischen 200 Hz und 1000 Hz besitzt. Sobald der Anschlag abgeklungen ist, bleiben im Spektrum Grund- und Oberschwingungen des angeschlagenen Klangstabes zurück. Die Grundschiwingung zeigt sich hier sehr stark ausgeprägt mit einer Frequenz von ca. 75 Hz, was angesichts der Tatsache, dass der Klangstab der Tonhöhe D₂ ($f_{D_2} = 73,4$ Hz) zugeordnet ist, recht gut ins Klangbild passt. Interessant ist, dass der erste Oberton im Spektrum eine Frequenz von ca. 300 Hz besitzt, was recht genau einem D₄ ($f_{D_4} = 293,7$ Hz) entspricht. Somit sind weder die erste Oktav der Grundschiwingung, noch die erste oder zweite Quint über der Grundschiwingung als Obertöne vertreten. Weitere Obertöne höherer Ordnung können wir beim F erkennen, welches zum D im Intervall einer kleinen Terz steht. Die kleine Terz ist von großer Bedeutung für das Tongeschlecht „Moll“. Zur Bildung von Moll-Tonleitern und -Akkorden wird die kleine Terz des Grundtons verwendet, für „Dur“-Tonleitern und Akkorde die große Terz einen Halbton über der kleinen Terz.

Nun folgt die Analyse des Zeitlupenvideos. Wie zu sehen ist, beginnt der Klangstab beim Schlag zu schwingen, was mit freiem Auge nicht sichtbar ist. Die Charakteristik dieser

Schwingung soll nun genauer untersucht werden. Hierzu wird die Analysesoftware Measure Dynamics verwendet, bei welcher man beliebige Punkte im Film bestimmen und deren Bewegung verfolgen kann. Leider funktioniert dies in diesem Fall aufgrund zu geringerer Farb- und Kontrastunterschiede zwischen Klangstab und Hintergrund nicht in zufriedenstellender Weise. Daher wird zur Ermittlung der Schwingfrequenz folgendermaßen improvisiert. Bekannt ist die Aufnahmebildrate der High-Speed-Kamera von 1200 fps. Mit Measure Dynamics kann man in einem Film Frame für Frame einzeln betrachten. Nun wird ein Schwingungsdurchgang Frame für Frame abgespielt, die Frameanzahl einer Schwingungsperiode wird abgezählt. So ergab sich für einen Schwingungsdurchgang eine Frameanzahl von 16 Frames.

Im Wissen, dass die Kamera pro Sekunde 1200 Frames aufnimmt, können wir nun für eine Periode den Wert

$$T_H = \frac{16}{1200} \text{ s} = 0,013 \text{ s} \quad 4.3$$

festlegen. Die Frequenz der Schwingung des hölzernen Klangstabes ergibt sich aus dem Kehrwert der Periode:

$$f_H = \frac{1}{0,013 \text{ s}} = 76,9 \text{ Hz} \quad 4.4$$

Mit diesem Frequenzwert von $f_H = 76,9 \text{ Hz}$ kommen wir der tatsächlichen Frequenz der Grundschiwingung $f_{Grund} \sim 75 \text{ Hz}$ des hölzernen Klangstabes sehr nahe und haben somit festgestellt, dass die Grundschiwingung des Klangstabes im Zeitlupenvideo ersichtlich wird.

Es folgt die Analyse des Vibraphons. Versuchsaufbau und -durchführung sind bei Marimbaphon und Vibraphon identisch und werden daher nun nicht weiter erwähnt.

Beobachtung:

Betrachten wir zunächst das Frequenzspektrum des Vibraphons.

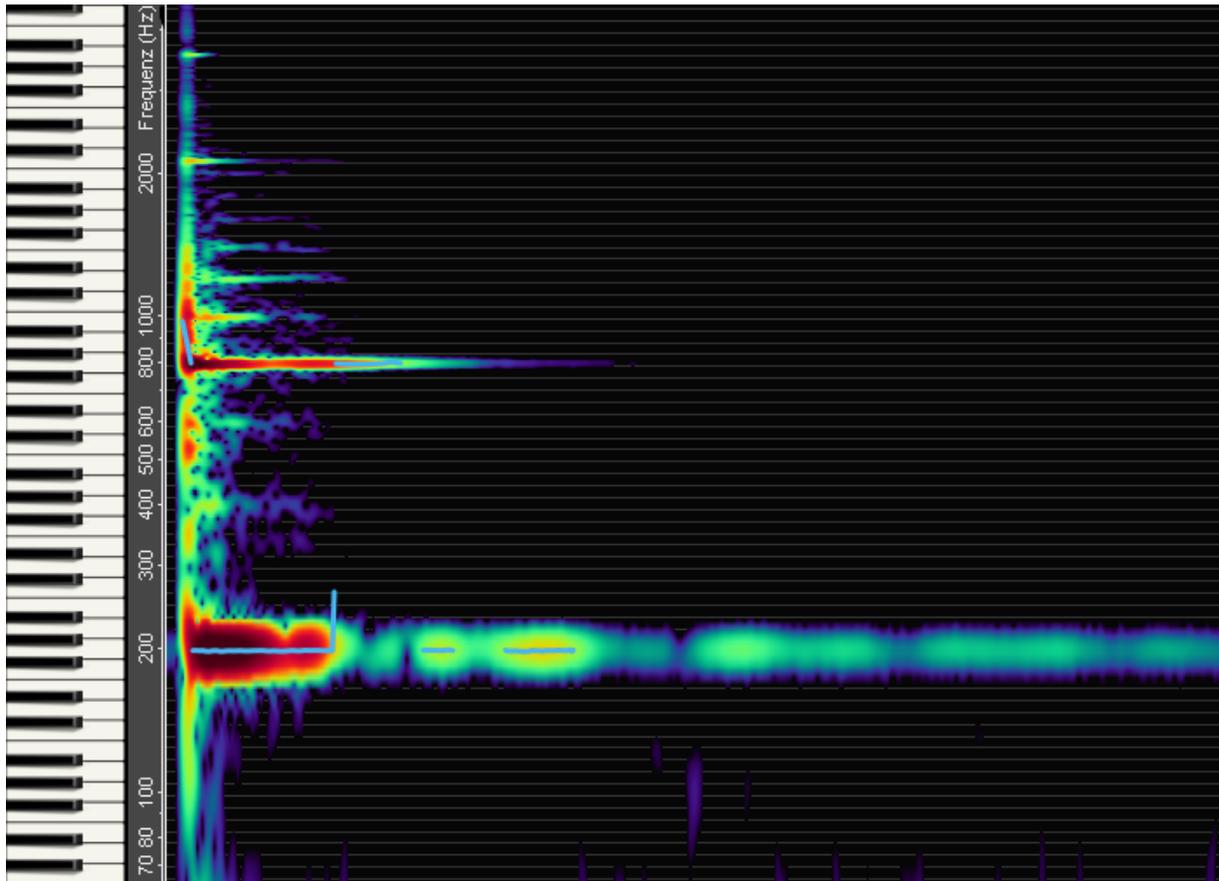


Abb. 100: Frequenzspektrum eines Vibraphonstabes der Tonhöhe G.

Der Klang des metallenen Klangstabes der Tonhöhe G zeigt sich im Spektrum in Abb. 100 als nicht besonders obertonreich. Während im Spektrum des hölzernen Marimbaphonklangstabes vier ausgeprägte Oberschwingungen erkennbar waren, setzt sich dieses Frequenzspektrum aus nur zwei stärker ausgeprägten Einzeltönen zusammen: der Grundfrequenz, welche ihren Peak bei ca. 200 Hz besitzt und damit der Tonhöhe des G₃, welches eine Frequenz von ca. 196 Hz besitzt, recht nahekommt, und einem stärker ausgeprägten Oberton bei ca. 800 Hz. Diese Frequenz entspricht der musikalischen Tonhöhe eines G₅ und befindet sich damit zwei Oktaven oberhalb der Grundfrequenz. Der große Frequenzabstand zwischen Grundfrequenz und erstem Oberton ist auch beim zuvor vorgestellten Marimbaphon beobachtbar.

Weitere Obertöne des metallenen Klangstabes besitzen bei weitem schwächere Ausprägungen und klingen zudem recht schnell aus.

Wie beim Marimbaphon soll nun die Schwingung des metallenen Klangstabes anhand des Zeitlupenvideos untersucht und spektral eingeordnet werden. Die Periodendauer ist hier bei weitem kürzer als beim tiefer klingenden hölzernen Klangstab, deshalb werden die Framezahlen mehrerer Schwingungsdurchgänge abgezählt und ein Mittelwert gebildet, um die Genauigkeit zu erhöhen.

Zählung Nr.	Frames / Periode
1	7
2	6
3	6
4	6
5	6
6	6
7	6
8	6
9	6
10	6

Der Mittelwert wird errechnet:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \cdot 61 = 6,1 \quad 4.5$$

Somit ist die Periodendauer bekannt:

$$T_M = \frac{6,1}{1200} \text{ s} = 0,0051 \text{ s} \quad 4.6$$

Die Frequenz ergibt sich aus dem Kehrwert der Periodendauer zu

$$f_M = \frac{1}{0,0051 \text{ s}} = 196,1 \text{ Hz} \quad 4.7$$

Dieser Frequenzwert stimmt sowohl mit dem aus dem Spektrum bekannten Wert für die Grundfrequenz als auch mit dem Frequenzwert für den Ton G3 sehr gut überein. Somit ist auch im Falle des Metallophons die Grundschiwingung im Zeitlupenvideo ersichtlich.

Die Physik von Klangstäben:

Zur Beschreibung des physikalischen Verhaltens realer Gegenstände greift man häufig auf idealisierte Modelle des zu beschreibenden Gegenstands zurück. Hierzu werden herrschende Umstände, welche Einfluss auf dieses Verhalten haben, oftmals vereinfacht oder ignoriert, um Berechnungen zu erleichtern oder überhaupt zu ermöglichen.

Im Falle der Paukenmembran geschieht dies, indem die Spannkraft, welche die Membran über dem Rahmen hält, außerdem verschiedene Parameter der Membran wie Dicke, Dichte usw. als überall gleich angenommen werden. Durch diese und weitere Vereinfachungsschritte erhält man das Modell einer „Idealen Membran“. Die errechneten Schwingungsmoden einer solchen idealen Membran sind weiter oben grafisch dargestellt und korrelieren mit den experimentell ermittelten Ergebnissen der nicht-idealen Paukenmembran.

Im Falle der Klangstäbe kann man ebenfalls Verallgemeinerungen hinsichtlich der Form, Materialdichte, Elastizität usw. anstellen. So wird ein „idealer Klangstab“ als quaderförmig angenommen, obwohl die in der Praxis verwendeten Klangstäbe von Marimbaphonen usw. oftmals eine leicht andere Form besitzen. Die Gründe hierfür werden im Folgenden erläutert. Bei der Anregung des Klangstabes durch einen Schlag mit einem Schlägel treten verschiedene Arten von Schwingungen auf:

- Longitudinale Schwingungen (Stoßwellen durch das Stabmaterial)
- Torsionsschwingungen (Verdrehungen bzw. Verdrillungen des Materials, welche vom Anschlag hervorgerufen werden)
- Transversale Schwingungen (Hauptverantwortlich für das Klangspektrum des Klangstabes)

Diese verschiedenen Schwingungsformen erzeugen Schallwellen unterschiedlicher Ausprägung und Intensität. Longitudinale und Transversale Schwingungen besitzen ein unregelmäßiges bzw. unharmonisches Obertonspektrum, nur die recht schwach ausgeprägten Torsionsschwingungen besitzen eine regelmäßige Obertonstruktur. Den wichtigsten Beitrag zum Spektrum eines idealisierten Klangstabes liefern die Transversalen Schwingungen, welche auch Biegeschwingungen genannt werden. Die Klangstäbe von Idiophonen wie dem Marimbaphon oder dem Vibraphon werden nämlich beim Anschlag in der folgenden Weise verbogen:

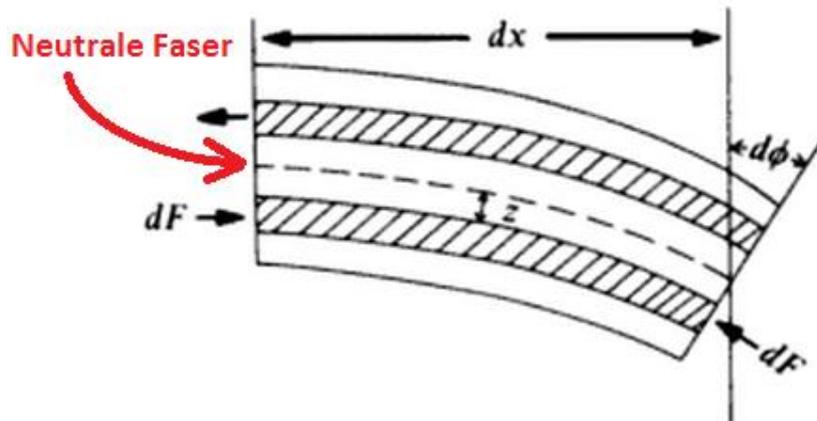


Abb. 101. Skizze eines gebogenen Stabes.

Bei einer Verbiegung, wie sie in Abb. 101 skizziert dargestellt ist, werden die „außen“ liegenden Fasern des Stabmaterials gedehnt, die „innen“ liegenden Fasern komprimiert. In der Mitte existiert eine Zone, in der sich die Länge des Stabmaterials nicht verändert. Diese wird „neutrale Faser“ genannt. Die Biegeschwingung kommt zustande, indem das Material an der Ober- und Unterseite des angeschlagenen Klangstabes abwechselnd gedehnt und komprimiert wird. Im Folgenden wird die Natur der Schwingungen, welche aus einer solchen Verbiegung resultieren, untersucht und hergeleitet. Die Herleitung bezieht sich einerseits auf die Herleitung im Buch „Principles of Vibration and Sound“ von Fletcher und Rossing, andererseits auf einen Aufsatz über Glocken und Xylophone, welcher an der Uni Regensburg verfasst wurde. Die dort zu findende Herleitung bezieht sich ebenfalls auf das erwähnte Buch von Fletcher und Rossing. Die Adresse des Links zu diesem Aufsatz findet sich im Anhang unter [12].

Wir betrachten ein Teilstück des Stabes, welches die Querschnittsfläche dS besitzt. Dieses befindet sich im Abstand z zur rot vermerkten neutralen Faser. Wird der Stab um den Winkel $d\Phi$ gebogen, so ruft dies im betrachteten Stabstück eine Biegespannung von

$$z \cdot \frac{d\Phi}{dx} \quad 4.8$$

hervor. Zur Biegung benötigt man die Kraft

$$\vec{F}_B = z \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot E \cdot dS \quad 4.9$$

mit E als Elastizitätsmodul des Stabmaterials. Das angreifende Biegemoment ist

$$dM_B = \left(z \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot E \cdot dS \right) \cdot z \quad 4.10$$

Durch Integrieren erhält man das gesamte Biegemoment:

$$M_B = \int dM_B = E \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot \int z^2 \cdot dS \quad 4.11$$

Zur Vereinfachung wird nun der Trägheitsradius K eingeführt:

$$K^2 = \frac{1}{S} \cdot \int z^2 \cdot dS \quad 4.12$$

Hierbei stellt $S = \int dS$ den gesamten Stabquerschnitt dar. Abb. 102 zeigt, wie sich Trägheitsradien für verschiedene einfache Stabformen ergeben:

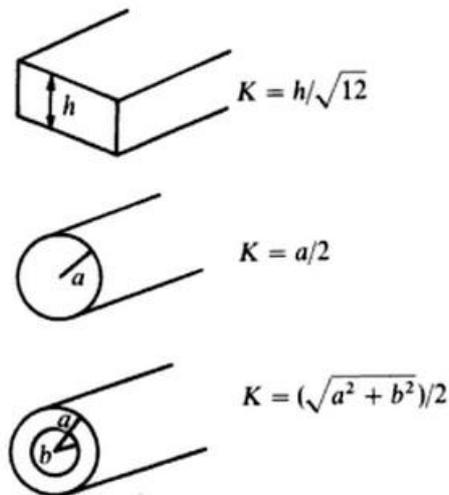


Abb. 102: Trägheitsradien einfacher Stabformen

Mit der Einbeziehung des Trägheitsradius ergibt sich das Biegemoment zu

$$M_B = E \cdot \frac{d\Phi}{dx} \cdot S \cdot K^2 \cong -E \cdot S \cdot K^2 \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad 4.13$$

Hierbei nutzen wir den Umstand, dass für kleine Winkel

$$d\Phi \cong -\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right) \cdot dx \quad 4.14$$

gilt. Damit ergibt sich für die Scherkraft

$$\vec{F}_S = \frac{\partial M}{\partial x} = -E \cdot S \cdot K^2 \cdot \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad 4.15$$

Nun wollen wir hieraus die Bewegungsgleichung bilden:

$$\frac{\partial \vec{F}_S}{\partial x} \cdot dx = (\rho \cdot S \cdot dx) \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad 4.16$$

mit ρ als Materialdichte. Dies führt zu

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{E \cdot K^2}{\rho} \cdot \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} \quad 4.17$$

Um diese Differentialgleichung 4. Ordnung zu lösen, müssen wir Randbedingungen einführen. Diese ergeben sich aus der Betrachtung der Stabenden. Diese können frei, aufgelegt oder fixiert sein. Hierzu stellen wir den folgenden Lösungsansatz auf:

$$y = \cos(\omega t + \Phi) \cdot [A \cdot \cosh(kx) + B \cdot \sinh(kx) + C \cdot \cos(kx) + D \cdot \sin(kx)] \quad 4.18$$

Für zwei freie Enden gilt die Randbedingung

$$\tan(x) = \pm \tanh(x) \quad 4.19$$

Wir lösen dies grafisch mithilfe der im folgenden Bild dargestellten Kurven.

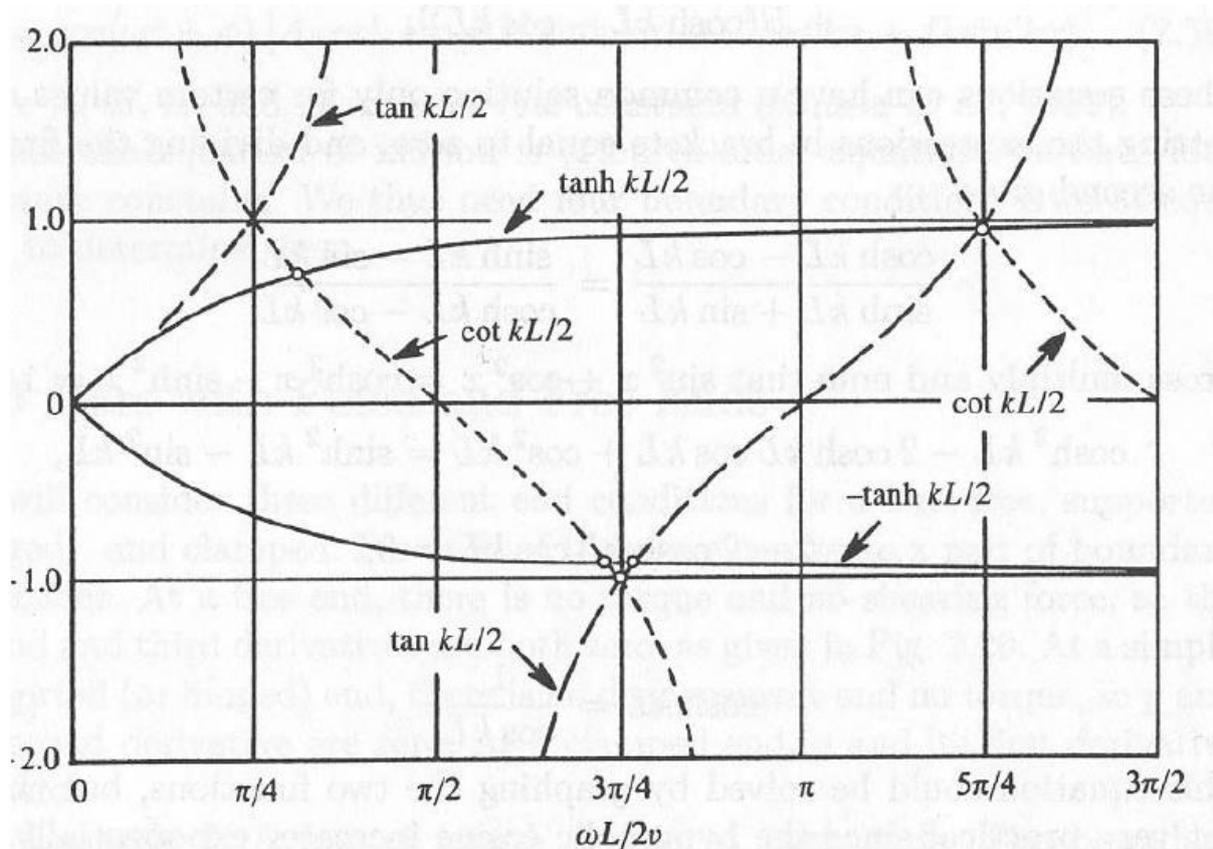


Abb. 103: Trigonometrische Funktionen zur Lösung der Differentialgleichung

Hieraus ergeben sich die folgenden Lösungen für verschiedene Randbedingungen:

Für zwei freie Enden:

$$f_n = \frac{\pi \cdot K}{8 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot (2n + 1)^2 \quad 4.20$$

Für ein freies und ein aufgelegtes Ende:

$$f_n = \frac{\pi \cdot K}{8 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot (2n - 1)^2 \quad 4.21$$

Und für zwei feste Enden:

$$f_n = \frac{\pi \cdot K}{8 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot n^2; \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad 4.22$$

Setzt man in die ermittelten Formeln ganzzahlige Werte für n ein, so ergeben sich Frequenzen, welche in keinen harmonischen Frequenzverhältnissen zueinander stehen, die sich

ausbildenden Obertöne sind also nicht harmonisch geordnet! In Abb. 104 sehen wir die Schwingungsmoden eines idealisierten rechteckigen Stabes mit verschiedenen Randbedingungen. Diese Schwingungsmoden können den verschiedenen entstehenden Obertönen zugeordnet werden.

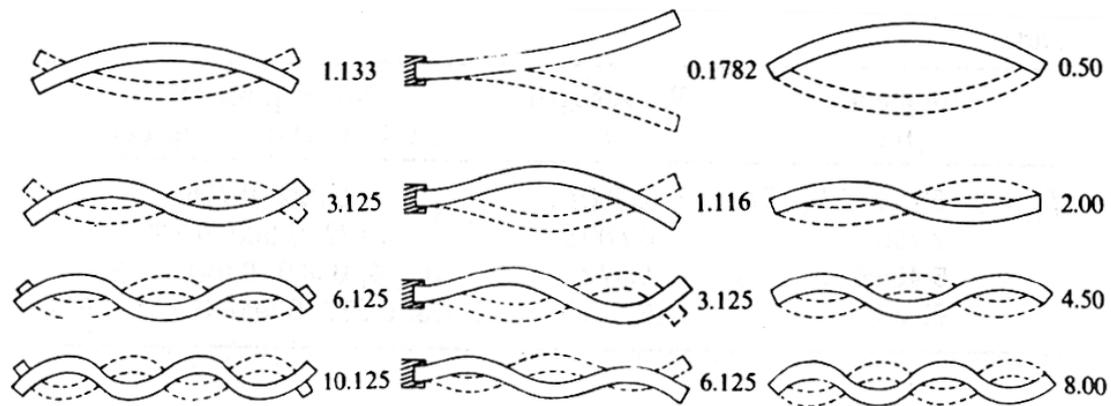


Abb. 104: Biegeschwingungsmoden eines idealisierten rechteckigen Stabes

Die Obertöne der transversalen Schwingungen des Klangstabes unterstehen also keiner harmonischen Ordnung. Wie wird nun bei der Erzeugung von Musikinstrumenten mit diesen unharmonischen Obertönen umgegangen? Bei einigen Idiophonen wie dem Glockenspiel werden dennoch Klangstäbe verwendet, welche wie das idealisierte Klangstabmodell Quaderform besitzen. Tatsächlich stehen die Obertöne des Glockenspiels in keinem harmonischen Verhältnis zu den Grundfrequenzen der Klangstäbe. Jedoch klingen diese sehr schnell aus und befinden sich zudem in sehr hohen Frequenzbereichen, weshalb das Obertonspektrum beim Glockenspiel eine eher untergeordnete Rolle spielt. Anders verhält sich dies bei den hier behandelten Instrumenten, dem Marimbaphon und dem Vibraphon. Diese besitzen Klangstäbe, deren Grundfrequenzen so tief sind, dass die Obertöne gut hörbar sind, und deshalb, um einen harmonischen Höreindruck hervorzurufen, an die Grundfrequenz angepasst werden müssen. Diese Anpassung wird durch eine Modifikation der idealen Quaderform erreicht; hierzu wird an der der Anschlagfläche abgewandten Seite etwas Stabmaterial entfernt, sodass der Klangstab eine Form erhält, welche der Form des Stabes in der folgenden Skizze ähnelt.



Abb. 105: Querschnitt eines Klangstabes wie er bei Marimbaphonen, Xylophonen oder Metallophonen verwendet wird.

Diese Aushöhlung an der Unterseite bewirkt einerseits eine Verschiebung des gesamten Spektrums in niedrigere Bereiche. Somit ist es möglich, für tiefe Töne kürzere Klangstäbe zu verwenden als bei Klangstäben ohne Aushöhlung. Andererseits bewirkt das gezielte Entfernen von Material von bestimmten Stellen Frequenzveränderungen im Obertonspektrum. Von besonderer Bedeutung sind hier jene Bereiche, in denen das Biegemoment für eine bestimmte Mode (siehe Herleitung) groß ist. Entfernt man an dieser Stelle ein wenig Material, so verringert sich die Frequenz des der Mode zugehörigen Obertons. Die Erhöhung von Obertonfrequenzen erreicht man, indem man an den Stabenden ein wenig Material entfernt. Für einen derartig bearbeiteten Klangstab ergeben sich so die in Abb. 106 beobachtbaren Schwingungsmoden:

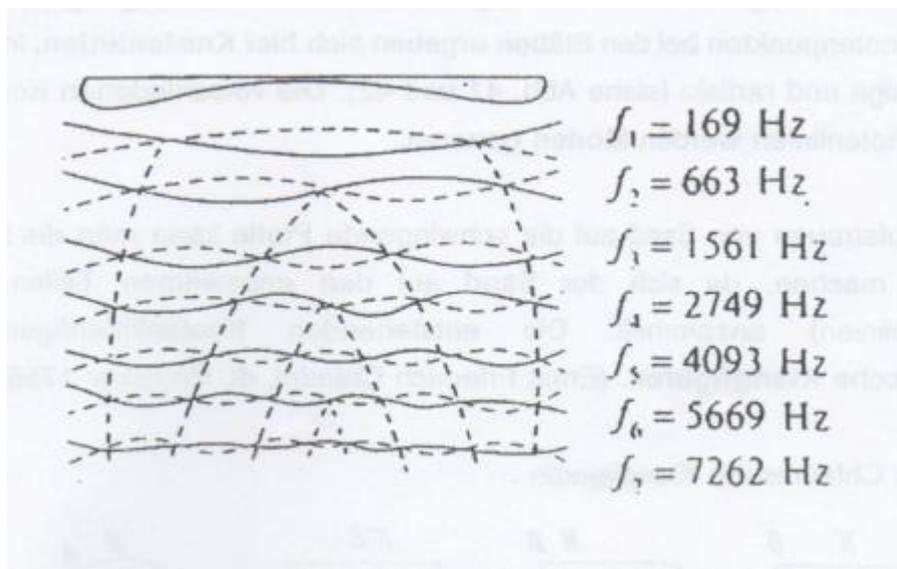


Abb. 106: Schwingungsmoden für einen Klangstab der Tonhöhe „E“

Die Marimbaphone stammen aus Afrika und stellen eine recht alte Instrumentenfamilie dar. Einige Zeichnungen von Instrumenten, welche dem Marimbaphon bzw. dem Xylophon ähnlich sind, stammen aus dem 16. Jhdt. und es ist davon auszugehen, dass auch vor dieser Zeit Holzstücke verschiedener Gestalt und Größe zur Erzeugung von Klängen verwendet wurden. Auch in Südamerika, besonders in Guatemala, besitzt das Marimbaphon einen hohen Stellenwert in der Volksmusik.

Das Vibraphon ist eine Weiterentwicklung des Marimbaphons. Zur Anregung von Resonanz bzw. Verstärkung des Klanges besitzt es wie das Marimbaphon unter den Klangstäben angebrachte Röhren, deren Eigenfrequenzen möglichst nahe den Eigenfrequenzen der Klangstäbe liegen. Weiters besitzt das Vibraphon einen Elektromotor, welcher oberhalb der Röhren angebrachte Platten bewegt, was einen schwebenden Klang ähnlich dem Klang eines Leslie-Speakers mit sich bringt.

Heute sind beide Instrumente recht weit verbreitet, besonders in der Volksmusik Afrikas und Lateinamerikas und im Jazz.

5. Quellenangaben:

[1]

<http://dingler.culture.hu-berlin.de/journal/page/pj123?p=70>, aufgerufen am 20.10.2014.

Auf dieser Website der HU Berlin werden historische Texte digitalisiert dargestellt.

[2]

S42, "Bestimmung thermophysikalischer Daten von Metallen bis in den Überhitzungsbereich der flüssigen Phase", Dissertation Prof. Gernot Pottlacher, TU Graz, 1987

[3]

Vgl. S43, "Bestimmung thermophysikalischer Daten von Metallen bis in den Überhitzungsbereich der flüssigen Phase", Dissertation Prof. Gernot Pottlacher, TU Graz, 1987

[4]

Vgl. S502, „Analoge und digitale Hochgeschwindigkeitskinematographie“, Joachim Holzfuß, Universität Darmstadt, veröffentlicht in „Technisches Messen 68“, 2001

[5]

Vgl. <http://www.pcwelt.de/ratgeber/CMOS-vs-CCD-Bildsensoren-5794727.html>, aufgerufen am 21.10.2014

[6]:

Vgl. S 196, „High speed and slow motion – the technology of modern high-speed-cameras“, Michael Vollmer & Klaus-Peter Möllmann, veröffentlicht von IOP Publishing in „Physics Education 46/2“, 2011. Übersetzt aus dem Englischen vom Verfasser dieser Arbeit.

[7]

Vgl. S559, "The Physics Of Musical Instruments", Fletcher & Rossing, 1991
Übersetzt aus dem Englischen vom Verfasser dieser Arbeit.

[8]

S 49 „Experimentalphysik 1“, Wolfgang Demtröder, Springer-Verlag, 1994

[9]

Vgl. S6, „Feuer und Flamme“, Dr. Gabriele Lange, Uni Rostock

[10]

Vgl. S7, „Feuer und Flamme“, Dr. Gabriele Lange, Uni Rostock

[11]

Vgl. „Mit Pauken und Trompeten“, Leopold Mathelitsch & Ivo Verovnik, S 34-35 in der Zeitschrift „Physik unserer Zeit“, Ausgabe 1/2014

[12]

Link zum Aufsatz „Xylophon und Glocke“: <http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/schwarz/PhysikMusik-2005/10-XylophonundGlocke.pdf>

6. Bildnachweis:

Abb. 1: Elektromagnetisches Frequenzspektrum

http://de.wikiversity.org/wiki/Datei:Electromagnetic_spectrum.svg

aufgerufen am 13.11.2014

Abb. 2: Retinale Bewegung

http://vmrz0100.vm.ruhr-uni-bochum.de/spomedial/content/e866/e2442/e8554/e8574/e8610/e8664/e8670/boc_bewwahr1ger.png, Abbildung aus de Marées, Sportpsychologie, 2002.

aufgerufen am 17.11.2014

Abb. 3: Kurzaufnahme von Eadweard Muybridge

<http://chroniclesofanimation.files.wordpress.com/2013/01/muybridgehorseinmotion.jpg>

aufgerufen am 20.10.2014

Abb. 4: Rapatronic-Kurzzeitaufnahme

<http://photos1.blogger.com/x/blogger2/7591/2992/1600/109762/tsspike.jpg>

aufgerufen am 03.11.2014

Abb. 5: Skizze der von Prof. Pottlacher verwendeten Schmierkamera

Entnommen aus "Bestimmung thermophysikalischer Daten von Metallen bis in den Überhitzungsbereich der flüssigen Phase", Dissertation Prof. Gernot Pottlacher, TU Graz, 1987

Abb. 6: Drehprismenkamera:

Bild und Bildbeschreibung entnommen aus

http://www.fen-net.de/walter.preiss/d/slomo_hy.htm,

aufgerufen am 20.10.2014

Abb. 7: Schematische und reale Darstellung einer Drehspiegelkamera

„a. Schematic of a synchronous rotating mirror framing camera. b. Photo of the interior of a Cordin 121“, S4, „Solid State Replacement of Rotating Mirror Cameras“, A.M. Frank, J.M. Bartolick, Lawrence Livermore National Laboratory, 2006

Abb. 8: Aufbau eines CCD-Sensorchips.

<http://www.olympusmicro.com/primer/digitalimaging/concepts/images/ccdanatomyfigure1.jpg>

aufgerufen am 22.10.2014

Abb. 9: Varianten des Datentransfers bei einem CCD-Sensorchip.

Bild entnommen aus S502, „Analoge und digitale Hochgeschwindigkeitskinematographie“, Joachim Holzfuß, Universität Darmstadt, veröffentlicht in „Technisches Messen 68“, 2001

Abb. 10: Blooming (Bildfehler).

<http://www.ccd-sensor.de/assets/images/blooming.jpg>

aufgerufen am 22.10.2014

Abb. 11: Aufbau eines CMOS-Sensorchips.

<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/images/cmos/cmoschipsfigure3.jpg>

aufgerufen am 22.10.2014

Abb. 12: Wassertropfen trifft auf Wasseroberfläche.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit

Abb. 13: Schematische Darstellung der Wirkungsweise des Huygens'schen Prinzips.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit

Abb. 14: Seilwellenmaschine in Betrieb.

Bildausschnitt aus dem zugehörigen Echtzeitvideo. Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit

Abb. 15: Seilwellenmaschine in Betrieb.

Bildausschnitt aus dem zugehörigen Zeitlupenvideo. Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 16 & Abb. 17: Staubhäufchen an den Wellenknoten im „Kundt'schen Rohr“

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 18: Resonanzkreisel in Bewegung.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 19: Klaviersaiten in Resonanz.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 20: Frequenzverhältnis Grundton-Oktav.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 21: Frequenzverhältnis Grundton-Quint.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 22 & Abb. 23: Lautsprecher in Bewegung.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 24: Magnetisches Wirbelfeld.

https://www.univie.ac.at/physikwiki/images/d/d9/Magnetfeld_um_einen_stromdurchflossenen_Leiter.jpg

aufgerufen am 27.10.2014

Abb. 25: Lautsprecher-Aufbau.

<http://www.musiker-board.de/attachments/lautsprecher-aufbau-jpg.351602/>

aufgerufen am 27.10.2014

Abb. 26, Abb. 27 & Abb. 28: Kerze im Schallfeld eines Lautsprechers.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 29: Unterschied Transversalwelle - Longitudinalwelle

<https://jmag0904.files.wordpress.com/2013/05/longvstransvwave.gif>

Aufgerufen am 23.02.2015, Modifikation (Deutsche Beschriftung) am 23.02.2015

Abb. 30 & Abb. 31: Chladni'sche Klangfiguren

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 32: Schlag auf Schlagzeugbecken – Bildausschnitt aus dem zugehörigen Zeitlupenvideo

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 33: Schwingungsmoden eines Schlagzeugbeckens

Entnommen aus S556, "The Physics Of Musical Instruments", Fletcher & Rossing, 1991

Abb. 34: Schlag auf Snare-Drum

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 35: Geigensaite wird gestrichen.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 36: Schematische Darstellung des Verlaufs der durch den Bogenstrich hervorgerufenen Knickwelle

<http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/graphics/kinks.GIF>

Aufgerufen am 03.11.2014

Abb. 37: Angeschlagene Gitarrensaite.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 38: Wassertropfen löst sich vom Wasserhahn.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 39: Skizze zur Oberflächenspannung.

Entnommen aus dem Vorbereitungsskriptum zu den Laborübungen „Mechanik und Wärme“,
Institut für Experimentalphysik der TU Graz, Mai 2013

Abb. 40: Verschiedene Formen fallender Tropfen.

RaindropShape.jpg, <http://upload.wikimedia.org/wikiversity/en/e/eb/RaindropShape.jpg>,

Aufgerufen am 15.09.2014, modifiziert (deutsche Beschriftung) am 23.02.2015.

Abb. 41: Wassertropfen trifft auf harte Oberfläche.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 42: Wasserballon zerplatzt.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 43-45: Projektil trifft Wasserballon.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 46: Wassertropfen auf heißer Herdplatte.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 47: Schematische Darstellung des Leidenfrost-Effekts.

http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/leidenfrost2_waermetrans_auf.gif

Aufgerufen am 02.10.2014

Abb. 48: Wasserballon fällt zu Boden.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 49 & Abb. 50: „Löschen“ eines Fettbrandes mit Wasser.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 51-57: Wiedorzünden der Kerze

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 58: Staubexplosion

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 59: Implosion eines Fernsehers

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 60: Explosion eines Wasserstoffballons.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 61: Explosion eines Methanballons.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 62: Spritzgurke schleudert ihre Samen aus.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 63: Startendes Space-Shuttle.

<http://www.researchgate.net/publictopics.PublicPostFileLoader.html?id=4ece2cb2ffea755b7d000000&key=8d1c84ece2cb2baa36>

Aufgerufen am 27.10.2014

Abb. 64: Spritzgurke beim Ausstoßen ihrer Samen.

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 65: Gottesanbeterin (Mantis religiosa)

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 66: Aufbau des Elihu-Thomson-Versuchs

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 67: Magnetische Feldlinien bei stromdurchflossener Spule

Fff3064_w.jpg, <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektromagnetismus/4060>

Aufgerufen am 24.09.2014

Abb. 68: Rechte-Faust-Regel

<https://ssl.gymnasium->

zwetl.ac.at/fachwissen/physik/vorlesung/PHYSIK/VORLESUNG/lehre/img763.gif

Aufgerufen am 25.09.2014

Abb. 69 & Abb. 70: Aufsteigendes Plasma (Jacob´s Ladder)

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 71: Elektrisches Monopolfeld.

http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/ph2_02/p202_101/img43.gif

Aufgerufen am 27.10.2014

Abb. 72: Elektrisches Dipolfeld.

<http://web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/web-hu-lectures/hu-lectures/www-eep.physik.hu-berlin.de/~hebbeker/lectures/eldipol2.gif>

Aufgerufen am 27.10.2014

Abb. 73: Glühlampe in Normalatmosphäre

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 74: Planck´sches Strahlungsspektrum

<http://me-lrt.de/img/mt-28-plancksches-strahlungsgesetz-spektrum.png>

Aufgerufen am 02.03.2015

Abb. 75: Entladung im Starter einer Leuchtstoffröhre

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 76: Abb. Glimmlampe schematisch

<http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/leuchtstoffroehre/glimmlampe.gif>

Aufgerufen am 07.10.2014

Abb. 77: Abb. Schaltkreis

<http://daten.didaktikchemie.uni-bayreuth.de/umat/leuchtstoffroehre/funktionsweise.gif>

Aufgerufen am 07.10.2014

Abb. 78: Spektrum

http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/admat_en/kap_5/illustr/fluorescent_spectrum.gif

Aufgerufen am 02.03.2015. Modifiziert (deutsche Beschriftung) am 02.03.2015.

Abb. 79: Brechen von Spaghetti

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 80: Drehimpuls.

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e4/Angular_momentum_circle.svg/512px-Angular_momentum_circle.svg.png

Aufgerufen am 02.10.2014

Abb. 81: Rechte-Faust-Regel.

http://www.systemdesign.ch/images/thumb/4/49/Rechte_Daumen_Regel.png/180px-Rechte_Daumen_Regel.png

Aufgerufen am 02.10.2014

Abb. 82: Versuchsaufbau zum Becher-Kugel-Versuch

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 83: Fallwege der Objekte beim Becher-Kugel-Versuch

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 84: Frequenzspektrum eines angeschlagenen Crash-Beckens

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 85: Gerätschaften zur Anregung von Resonanz bei Pauke und Steel-Drum

Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 86: Versuchsanordnung zur Anregung von Resonanz bei der Pauke
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 87: Frequenzspektrum der angeschlagenen Pauke
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 88-90: durch die Anregung entstandene Modenbilder
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 91: Bei der Resonanz entstandene Häufchen bzw. Dünen
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 92: Schwingungsmoden einer idealen Membran.
„Mit Pauken und Trompeten“, Leopold Mathelitsch & Ivo Verovnik, S 34-35 in der Zeitschrift
„Physik unserer Zeit“, Ausgabe 1/2014

Abb. 93: Bauarten von Steel-Drums.
„The Physics of Musical Instruments“, S570, Neville H. Fletcher / Thomas D. Rossing, 2.
Auflage, 1997

Abb. 94: Versuchsanordnung zur Anregung von Resonanz bei der Steel-Drum
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 95: Frequenzspektrum des angeschlagenen Steel-Drum-Tonfeldes
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 96 & Abb.97: Vergleich des mit Sand bestreuten Tonfeldes nach der Anregung (Abb. 97)
gegenüber vor der Anregung (Abb. 96).
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 98: Steel-Drum Moden.
„The Physics of Musical Instruments“, S572, Neville H. Fletcher / Thomas D. Rossing, 2.
Auflage, 1997

Abb. 99: Frequenzspektrum des angeschlagenen Marimbaphonstabes
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 100: Frequenzspektrum des angeschlagenen Vibraphonstabes
Erstellt vom Verfasser dieser Diplomarbeit.

Abb. 101: Gebogener Stab: „Principles of Vibration and Sound“, S 54 , Neville H. Fletcher / Thomas D. Rossing, 2. Auflage, 1995. Deutsche Beschriftung hinzugefügt vom Verfasser dieser Arbeit am 21.02.2015.

Abb. 102: Trägheitsradien verschiedener Körperformen.
„Principles of Vibration and Sound“, S 55 , Neville H. Fletcher / Thomas D. Rossing, 2. Auflage, 1995. Deutsche Beschriftung hinzugefügt vom Verfasser dieser Arbeit am 21.02.2015.

Abb. 103: Trigonometrische Funktionen.

Entnommen aus <http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/schwarz/PhysikMusik-2005/10-XylophonundGlocke.pdf>, aufgerufen am 22.02.2015

Abb. 104: Biegeschwingungsmoden eines idealisierten rechteckigen Stabes.

Entnommen aus <http://www.physik.uni-regensburg.de/forschung/schwarz/PhysikMusik-2005/10-XylophonundGlocke.pdf>, aufgerufen am 22.02.2015

Abb. 105: Querschnitt eines Klangstabes.

„The Physics of Musical Instruments“, S536, Neville H. Fletcher / Thomas D. Rossing, 2. Auflage, 1997

Abb. 106: Schwingungsmoden eines Marimbastabes der Tonhöhe „E“

Entnommen aus Vorlesungsskriptum der LV „Musikalische Akustik“, S51, von O.Univ.-Prof. Dr. Robert Höldrich.

7. Referenzen

Die folgenden Programme bzw. Geräte wurden im Zuge dieser Arbeit verwendet:

Digitalkamera Casio Exilim EX-F1:

Diese Kamera vermag pro Sekunde bis zu 1200 Bilder aufzunehmen und zu verarbeiten und wurde für sämtliche Zeitlupenaufnahmen, welche in den erstellten Filmen vorkommen, verwendet. Leider wird diese Kamera momentan nicht hergestellt und ist daher nur schwer erhältlich.

Digitales Aufnahmegerät Edirol R09:

Dieses Gerät dient der Aufnahme von Audiodateien. Das Aufnahmeformat (.wav oder .mp3 in verschiedener Qualität) ist hierbei selbst einstellbar. Das Edirol R09 ist recht klein und handlich, die Qualität der Aufnahmen ist jedoch sehr gut (geringes Hintergrundrauschen, hochwertige Mikrofone). Sämtliche Klänge, welche später spektral ausgewertet wurden, wurden mit diesem Gerät aufgenommen, ebenso die physikalischen Beschreibungen zu den produzierten Videos. Siehe hierzu:

<http://www.roland.com/products/r-09/>

Sygyt Overtone Analyzer:

Diese Software dient der Analyse von Tönen, Klängen und Geräuschen. In einer frei erhältlichen Version kann man nur direkt von einem Mikrofon aufgenommene Klänge – sozusagen „live“ – analysieren lassen, in der Vollversion (bzw. einer Demoversion dieser Vollversion) kann man auch Audiodateien, welche zu einem anderen Zeitpunkt aufgenommen wurden, analysieren lassen. Sämtliche Spektren, welche in dieser Arbeit grafisch dargestellt wurden, wurden mit dieser Software erstellt.

Siehe hierzu auch:

<http://www.sygyt.com/de/overtone-analyzer>

Measure Dynamics Analysesoftware:

Measure Dynamics ist ein Computerprogramm, welches in vielfältiger Weise zur Analyse von in Videos stattfindenden Bewegungen verwendet werden kann. Im vorliegenden Fall wurde Measure Dynamics verwendet, um die Schwingungsdauer eines Vibraphonstabes zu ermitteln. Siehe hierzu: <http://www.phywe.com/489n379/>