



# Der Doppler-Effekt

Eine Facharbeit von Valentin Kraft im Leistungskurs Physik

## 1 Inhaltsverzeichnis

1.1	EINFÜHRUNG .....	3
2	THEORIE .....	5
2.1	PHYSIKALISCHE GRUNDBEGRIFFE DES SCHALLS / VORAUSSETZUNGEN FÜR DAS VERSTÄNDNIS .....	5
2.2	DIE DREI FÄLLE DES AKUSTISCHEN DOPPLER-EFFEKTS .....	6
2.2.1	SCHALLQUELLE BEWEGT – BEOBACHTER RUHT .....	6
2.2.2	SCHALLQUELLE RUHT – BEOBACHTER BEWEGT .....	8
2.2.3	SCHALLQUELLE UND BEOBACHTER BEWEGT .....	9
3	PRAXIS .....	10
3.1	ZIEL, VERSUCHSAUFBAU UND DURCHFÜHRUNG DES EXPERIMENTS ZUM NACHWEIS DES AKUSTISCHEN DOPPLER-EFFEKTS .....	10
3.2	AUSWERTUNG DES EXPERIMENTS / DARLEGUNG DER MESSERGEBNISSE .....	12
4	ADDENDUM / ABSCHLUSS .....	14
4.1	RELATIVISTISCHER / OPTISCHER DOPPLER-EFFEKT .....	14
4.2	ABSCHLIEßENDES FAZIT .....	15
5	ANHANG .....	16
5.1	LITERATURVERZEICHNIS .....	16
5.2	WEITERE QUELLEN .....	16
5.3	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	17
5.4	ABBILDUNGEN .....	18
5.5	SCHÜLERERKLÄRUNG .....	23

## 1.1 Einführung

Das Ziel dieser Facharbeit ist es zum einen, den so genannten „Doppler-Effekt“ anschaulich, verständlich und ausführlich zu erklären, also Ursachen, (Aus)wirkungen, und Anwendungen des Doppler-Effekts darzulegen und zu beschreiben.

Zum anderen werde ich im zweiten Teil dieser Facharbeit überprüfen, ob sich der Doppler-Effekt im Alltag auch *messen* und *erfahren* lässt – will heißen: Inwiefern passt die Theorie zur Praxis?

Doch zuerst einmal muss geklärt werden: Was genau ist der Doppler-Effekt eigentlich? Wikipedia definiert den Begriff kurz und prägnant wie folgt:

*Als Dopplereffekt [...] bezeichnet man die Veränderung der wahrgenommenen oder gemessenen Frequenz von Wellen jeder Art, während sich die Quelle und der Beobachter einander nähern oder voneinander entfernen, sich also relativ zueinander bewegen.<sup>1</sup>*

Anzumerken ist hierbei, dass ich mich in dieser Facharbeit nicht mit dem Doppler-Effekt bei Wellen „jeder Art“ (s.o.) auseinander setzen werde, sondern nur den *akustischen* Doppler-Effekt behandeln werde. Die Behandlung des Doppler-Effekts auch bei nicht medium gebundenen Wellen, wie beispielsweise bei Licht, würde den Rahmen dieser Facharbeit sprengen – daher werde ich nur abschließend im [Addendum](#) kurz auf diesen „besonderen“ und nicht alltäglich erfahrbaren Doppler-Effekt eingehen.

Denn dem akustischen Doppler-Effekt kann man heutzutage fast überall im Alltag begegnen. Fast jeder kennt das Phänomen, dass, wenn ein Krankenwagen unmittelbar an einem vorüberfährt, das Martinshorn beim Heranfahren des Wagens „höher“ klingt und beim Entfernen „tiefer“. Auch in der Formel 1 beispielsweise ist der Effekt der Tonhöhenverschiebung der Motor- bzw. Fahrgeräusche durch das Fernsehgerät ohne Probleme hörbar.

All diese Dinge lassen sich mit dem im Jahre 1842 von dem österreichischen Physiker und Mathematiker Christian Doppler (1803 – 1853) vorausgesagten und nach ihm benannten Doppler-Effekt erklären.

<sup>1</sup> Wikipedia, „Dopplereffekt – Wikipedia“, <http://de.wikipedia.org/wiki/Dopplereffekt>, 06.02.2008, S.1

Die Entdeckung dieses Effekts war für die gesamte Wissenschaft, und natürlich auch speziell für die Physik, von enormer Relevanz. Denn der Doppler-Effekt fand Anwendung in zahlreichen Gebieten der Wissenschaft. So wird und wurde durch ihn beispielsweise die Ausdehnung unseres Universums erforscht (siehe auch [Kapitel 4.1](#)). Auch in der Medizin ist er unentbehrlich geworden – so wird mit ihm z.B. die Blutstromgeschwindigkeit gemessen. Und auch beinahe alltägliche Dinge wie die Geschwindigkeitsmessungen durch die sogenannten (meist unbeliebten) „Radarfallen“ im Straßenverkehr beruhen auf Dopplers Entdeckungen.

Ansonsten ist meine Facharbeit wie folgt gegliedert: Die beiden übergeordneten Themenbereiche **Theorie** und **Praxis** bilden zusammen den Schwerpunkt der Arbeit. In der [Theorie](#) werde ich zuerst einmal die grundlegenden Dinge über Schallwellen erörtern und somit die Voraussetzungen für das Verständnis der folgenden Theorie schaffen. Im Weiteren werde ich die drei Fälle des akustischen Doppler-Effekts theoretisch beschreiben und die für die Rechnung nötigen Formeln herleiten. In der [Praxis](#) werde ich dann zuerst den Versuchsaufbau, mit dem ich den Doppler-Effekt nachweisen möchte, erläutern, die Methodik vorstellen und die Versuchsdurchführung schildern. Abschließend stelle ich die Ergebnisse dar, werte sie aus, und werde sie mit der Theorie vergleichen. Eine Bewertung dieser Ergebnisse und die Schilderung der Probleme, die bei dem Experiment auftraten, werde ich ebenfalls in diesem Kapitel darlegen.

Im [Addendum](#) werde ich dann noch kurz auf den Doppler-Effekt bei nicht medium gebundenen Wellen (also den relativistischen bzw. optischen Doppler-Effekt) eingehen und zu diesem Thema auch Informationsquellen für weiterführende Betrachtungen angeben. Danach folgt noch ein sehr kurzes, allumfassendes Fazit. Abschließend folgt der [Anhang](#) mit Literaturverzeichnis, Schülererklärung und einigen großen Abbildungen bzw. Diagrammen.

Ich hoffe, in dieser Einleitung konnte ich einen Überblick über meine Facharbeit geben und deutlich machen, wieso gerade der (akustische) Doppler-Effekt sich so hervorragend als Thema für eine Facharbeit eignet. Denn er ist zum einen interessant, im Alltag erfahr- und messbar, theoretisch nicht allzu schwer zu erfassen, besitzt jedoch zum anderen auch enorme Möglichkeiten und Aspekte, die weitergehend, komplizierter und nicht im Alltag erfahrbar sind. Somit sind vor allem seine Vielseitigkeit und Messbarkeit, die Stärken, die ihn zu einem optimalen Facharbeits-Thema machen.

## 2 Theorie

### 2.1 Physikalische Grundbegriffe des Schalls / Voraussetzungen für das Verständnis<sup>2</sup>

Da ich für das Verständnis meiner Facharbeit kein physikalisches Fachwissen voraussetze, werde ich nun kurz die wesentlichen physikalischen Elemente, Grundregeln und –Begriffe des Schalls erläutern, die für das weitere Verständnis von Nöten sind; ferner werde ich auch die in der restlichen Arbeit benutzten Formelzeichen nun einführen.

Schall ist, physikalisch gesehen, eine Welle, genauer gesagt: Eine Longitudinalwelle. Das bedeutet, dass der Schwingungsvektor in Ausbreitungsrichtung der Welle steht. Das Gegenteil einer Longitudinalwelle ist eine Transversalwelle, die sich jedoch in Luft

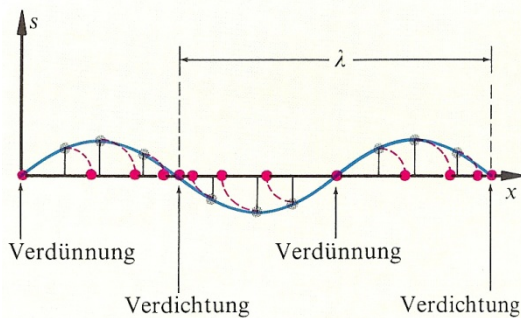


Abbildung 2.1.1: Eine Schallwelle mit bewegten Luftmolekülen im Querschnitt

nicht ausbreiten kann. Ferner braucht eine Schallwelle immer ein Medium, das sie transportiert; das „wichtigste“ Medium für uns Menschen (und für diese Facharbeit) ist dabei natürlich die Luft – im Vakuum ist also kein Schall möglich. Diese Tatsache resultiert daraus, dass die Schallwellen die Luftteilchen in Schwingung versetzen – somit

entstehen regelmäßige Verdünnungen und Verdichtungen der Luftteilchen, die dann letztendlich für unsere Ohren „hörbar“ sind. Ferner breiten sich Schallwellen immer konzentrisch um den Erreger (sofern dieser in Ruhe ist) aus – und das mit einer ganz bestimmten, konstanten **Schallgeschwindigkeit  $c$** , die vom Medium bestimmt ist. In der Luft ist  $c \cong 343 \frac{m}{s}$ , wobei dieser Wert<sup>3</sup> je nach Temperatur variiert (Obiger Wert gilt bei ca. 20° C). Die **Periode**, also die Zeit, die eine Schallwelle benötigt, um von einem „Wellenberg“ (Amplitude) zum nächsten zu gelangen, wird mit  $T$  bezeichnet und in Sekunden angegeben. Die **Frequenz**  $f = \frac{1}{T}$  ist der Kehrwert dieser Periode und gibt an, wie viele Schwingungen die Welle in einer Sekunde ausführt. Die Einheit der Frequenz ist  $\frac{1}{s}$ , auch **Hertz** (nach dem deutschen Physiker Heinrich Rudolf Hertz) genannt<sup>4</sup>. Der

<sup>2</sup> Vgl. Bader – Dorn 1983, S. 251ff., Grehn – Krause 1998, S. 144f., Facharbeit von Hendrik Richter, S.4 (URL siehe Anhang, Weitere Quellen)

<sup>3</sup> Wikipedia, „Schallgeschwindigkeit – Wikipedia“, <http://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit>, 09.02.2008, S.1

<sup>4</sup> Wikipedia, „Hertz (Einheit) – Wikipedia“, [http://de.wikipedia.org/wiki/Hertz\\_%28Einheit%29](http://de.wikipedia.org/wiki/Hertz_%28Einheit%29), 09.02.2008, S.1

Abstand zweier Wellenberge bzw. Wellentäler wird als **Wellenlänge** bezeichnet, mit dem griechischen Lambda  $\lambda$  dargestellt, und in Metern gemessen.

In der weiteren Arbeit werde ich nun folgende physikalische Größen gebrauchen:

$f_s$  = die Frequenz der vom Sender ausgehenden Welle

$\lambda_s$  = die Wellenlänge der vom Sender ausgehenden Welle

$v_s$  = die Geschwindigkeit des Senders (in  $\frac{m}{s}$ )

$c$  = die Schallgeschwindigkeit (Während der Durchführung des Experiments betrug diese bei einer Temperatur von ca.  $5^\circ\text{C} \cong 334,5 \frac{m}{s}$ )<sup>5</sup>

$f_e$  = die Frequenz, die der Wellenempfänger wahrnimmt

$\lambda_e$  = die Wellenlänge, die der Wellenempfänger wahrnimmt

$v_e$  = die Geschwindigkeit des Wellenempfängers (in  $\frac{m}{s}$ )

## 2.2 Die drei Fälle des akustischen Doppler-Effekts<sup>6</sup>

Zu unterscheiden sind drei wesentliche Arten, wie sich Wellensender und –Empfänger (also Schallquelle und Beobachter) zueinander bewegen können. Entweder der Sender bewegt sich und der Empfänger ruht (in beiden Fällen relativ zum Medium der Wellenausbreitung betrachtet), oder aber der Empfänger bewegt sich und der Sender ruht relativ zum Medium. Die dritte Möglichkeit ist, dass sich Sender *und* Empfänger relativ zueinander bewegen. Der Einfachheit halber werde ich im Folgenden davon ausgehen, dass sich Sender und Empfänger nur auf ihrer direkten Verbindungslinie und mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v_s$  bzw.  $v_e$  bewegen.

### 2.2.1 Schallquelle bewegt – Beobachter ruht

#### 2.2.1.1 Schallquelle bewegt sich auf den Beobachter zu

<sup>5</sup> Wikipedia, „Schallgeschwindigkeit – Wikipedia“, <http://de.wikipedia.org/wiki/Schallgeschwindigkeit>, 09.02.2008, S.1

<sup>6</sup> Herleitung der Formeln: Vgl. Bader – Dorn 1983, S. 273ff.

Da das Newtonsche Weg-Zeit-Gesetz der gleichförmigen Bewegung  $s = v \cdot t$  für alle mechanischen Bewegungen gültig ist<sup>7</sup>, folgt, wenn man es auf unsere Schallwelle überträgt:

$$\lambda_s = c T$$

Setzt man nun für  $T = \frac{1}{f}$  ein, erhält man

$$\lambda_s = \frac{c}{f_s}$$

Wenn sich nun die Schallquelle mit einer konstanten Geschwindigkeit  $v_s$  auf den Beobachter zu bewegt, eilt sie damit (sofern  $v_s < c$  gilt) den ausgesandten Wellenzügen hinterher – gleichzeitig sendet sie aber weiterhin neue Wellenzüge aus. Somit hat sich

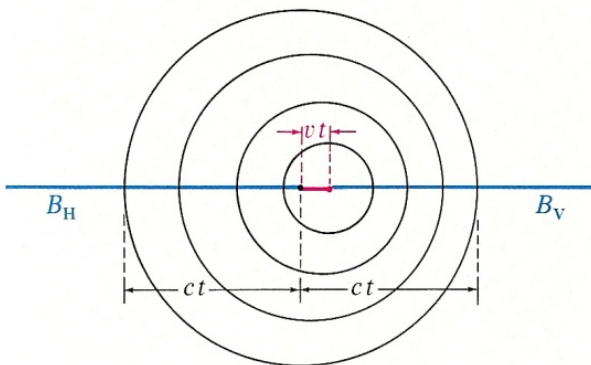


Abbildung 2.2.1: Wellenfronten werden zusammengedrängt bzw. auseinandergezogen

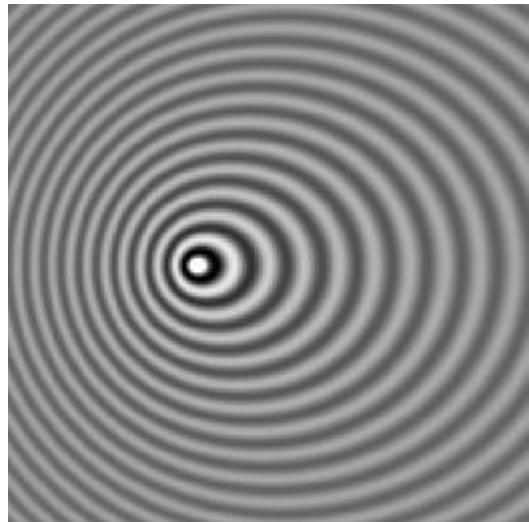


Abbildung 2.2.2: Visualisierung der Wellenlängenveränderung der Schallwellen

die Schallquelle in der Zeit  $t$  um die Strecke  $s_s = v_s \cdot t$  weiterbewegt. Der vorderste Wellenberg hat in derselben Zeit den Weg  $s_{wellenberg} = c \cdot t$  zurückgelegt. Dadurch werden die  $f \cdot t$  Wellenberge vor dem Erreger auf die Strecke  $s_{wellenberg} - s_s = (c - v_s)t$  zusammengedrängt. Folglich muss sich die Wellenlänge, die der ruhende Beobachter empfängt, ebenfalls verkürzen (siehe Abbildungen). Es gilt nun für die Wellenlänge  $\lambda_e$ :

$$\lambda_e = \frac{(c - v_s)t}{f_s t} = \frac{c - v_s}{f_s}$$

(Gleichung 2.2.1.1.1)

<sup>7</sup> Vgl. Facharbeit von Hendrik Richter, S.4

Für die Frequenz, die der Empfänger wahrnimmt, gilt somit (da  $f = \frac{c}{\lambda}$ ):

$$f_e = \frac{c}{\lambda_e} \Rightarrow f_e = \frac{c}{\frac{c - v_s}{f_s}} = \frac{c f_s}{c - v_s} = \frac{f_s}{\frac{c - v_s}{c}} = \frac{f_s}{1 - \frac{v_s}{c}}$$

(Gleichung 2.2.1.1.2)

### 2.2.1.2 Schallquelle bewegt sich von dem Beobachter weg

Wenn sich die Schallquelle nun von dem Beobachter weg bewegt, werden die Wellenberge der Schallwelle auf die Strecke  $s_{\text{wellenberg}} + s_s = (c + v_s)t$  (Formelherleitung siehe Kapitel 2.2.1.1) auseinander gezogen. Folglich gilt für die Wellenlänge  $\lambda_e = \frac{c + v_s}{f_s}$ . Daraus folgt:

$$f_e = \frac{f_s}{1 + \frac{v_s}{c}}$$

(Gleichung 2.2.1.2.1)

**Aus den Formeln lässt sich also schließen: Wenn sich die Schallquelle auf den Beobachter zu bewegt, verändert sich die Wellenlänge  $\lambda$  der Wellen und es erscheint die Frequenz (und somit die Tonhöhe) größer – Entfernt sich die Quelle, erscheinen Frequenz und Tonhöhe tiefer. Dies deckt sich mit den Alltagserfahrungen, beispielsweise bei dem vorbeifahrenden Krankenwagen.**

## 2.2.2 Schallquelle ruht – Beobachter bewegt<sup>8</sup>

### 2.2.2.1 Beobachter bewegt sich auf die Schallquelle zu

Betrachten wir nun den Fall, dass der Beobachter sich auf die ruhende Schallquelle zu bewegt, so lassen sich einige Unterschiede zum vorherigen Fall erkennen. Denn auch für den bewegten Beobachter bleibt die Wellenlänge  $\lambda$  bei einer ruhenden Schallquelle konstant:  $\lambda_e = \lambda_s$ . Vielmehr erhöht sich für ihn die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Wellen, da er sich zusätzlich mit einer Geschwindigkeit  $v_e$  auf die Wellen bzw. den Wellensender zu bewegt. Somit gilt:

$$f_e = \frac{c + v_e}{\lambda}$$

(Gleichung 2.2.2.1.1)

Und da  $\lambda = \frac{c}{f}$ :

<sup>8</sup> Vgl. Bader – Dorn 1983, S. 274f.



$$f_e = \frac{c + v_e}{\frac{c}{f_s}} = f_s \frac{c + v_e}{c} = f_s \left(1 + \frac{v_e}{c}\right)$$

### 2.2.2.2 Beobachter bewegt sich von der Schallquelle weg

Wenn sich der Beobachter nun von der Schallquelle weg bewegt, verringert sich für ihn die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der Wellen, und es gilt  $f_e = \frac{c - v_e}{\lambda}$ , und somit auch:

$$f_e = f_s \left(1 - \frac{v_e}{c}\right)$$

**Aus den Formeln lässt sich also schließen: Wenn sich der Beobachter auf die Schallquelle zu bewegt, ändert sich für ihn die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  (die Wellenlänge  $\lambda$  bleibt konstant) und die wahrgenommene Frequenz (und somit Tonhöhe) erhöht sich – Entfernt sich der Beobachter, erscheinen Frequenz und Tonhöhe tiefer.**

### 2.2.3 Schallquelle und Beobachter bewegt

Wenn wir nun davon ausgehen, dass sich Schallquelle *und* Beobachter aufeinander zu bzw. voneinander weg bewegen, müssen wir eigentlich nur beide oben beschriebenen „Ideen“ kombinieren. Dazu setzen wir für die „unveränderte“ Wellenlänge  $\lambda$  von Gleichung 2.2.2.1.1 einfach die Wellenlänge  $\lambda_e$  (Gleichung 2.2.1.1.1) ein, die der Beobachter bei bewegter Schallquelle wahrnimmt. Somit ergibt sich für die wahrgenommene Frequenz  $f_e$  des Beobachters, wenn sich sowohl Schallquelle, als auch Beobachter bewegen:

$$f_e = \frac{c + v_e}{\lambda_e}$$

Einsetzen von  $\lambda_e$  (Gleichung 2.2.1.1.1) ergibt:

$$f_e = \frac{c \pm v_e}{\frac{c \pm v_s}{f_s}} = f_s \frac{c \pm v_e}{c \pm v_s}$$

Je nach dem, ob sich Schallquelle bzw. Beobachter dem jeweils anderen nun nähern, oder sich entfernen, müssen ihre Geschwindigkeiten  $v_s$  bzw.  $v_e$  zu der Schallgeschwindigkeit  $c$  addiert oder subtrahiert werden.

### 3 Praxis

#### 3.1 Ziel, Versuchsaufbau und Durchführung des Experiments zum Nachweis des akustischen Doppler-Effekts

Kommen wir nun zu dem zweiten Schwerpunkt dieser Facharbeit – der Versuch einer praktischen Messung des Doppler-Effekts im Alltag. Das Ziel des Experiments, das ich nun im Folgenden detailliert beschreiben werde, war also der praktische Beweis der oben, in Kapitel 2, hergeleiteten Formeln.

Dabei hatte ich mir überlegt, dass sich über die Frequenzverschiebung des Huptons



Abbildung 3.1.2: Die Teststrecke und das „Versuchsauto“

Wochenende mit der Hilfe von Marian Turowski, der das „Versuchsauto“ (ein BMW



Abbildung 3.1.1: Das Aufnahmegerät

nehmen, um die Stärke der Frequenzverschiebung später berechnen zu können. Danach folgte die digitale Aufnahme des Huptons bei (laut Tachoanzeige):

- ▶  $30 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cong 8,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ▶  $40 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cong 11,11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- ▶  $50 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cong 13,88 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

eines Autos, das mit einer gewissen, konstanten Geschwindigkeit auf einen Beobachter zufährt, über die Doppler-Formeln die Geschwindigkeit berechnen ließe, und diese dann mit der am Tacho abgelesenen Geschwindigkeit verglichen werden könnte. Diese

Idee setzte ich dann an einem Wochenende mit der Hilfe von Marian Turowski, der das „Versuchsauto“ (ein BMW 525i) fuhr (Vielen Dank an dieser Stelle an ihn), auf der Parallelstrecke der Oldentruper Straße (zwischen Stralsunder Straße und „Am Wiehagen“) um. Dabei ging ich wie folgt vor:

Zuerst musste ich den Hupton des Autos in Ruhe digital auf-

$$\blacktriangleright 60 \frac{km}{h} \cong 16,66 \frac{m}{s}$$

(Der Abstand zwischen vorbeifahrendem Auto und Mikrofon wurde so klein wie möglich gewählt; Aufgenommen wurde das Hupsignal sowohl beim auf den Beobachter zufahrenden Auto, als auch beim sich entfernenden Auto).

Nun folgte die Bearbeitung der Sounddateien am Computer. Dazu wählte ich das Profi-Programm „Adobe Audition“ in der Version 1.5.

Dieses Programm bot die Funktion, die Audio-Dateien mittels einer sogenannten „Fourier-Analyse“<sup>9</sup> in ihre Frequenzen zu „zerlegen“ und dieses grafisch auszugeben. Doch leider zeigte die Fourier-Darstellung des Huptons in Ruhe, dass das Hupgeräusch *nicht* aus einer einzigen, ganz bestimmten Frequenz bestand, sondern vielmehr eine „Mischung“ aus sehr vielen verschiedenen Frequenzen war (siehe Anhang, Bild 1, Seite 18). Dieses Problem war jedoch schnell gelöst, indem ich mir aus den vielen Frequenzen einfach eine ganz bestimmte Frequenz herausnahm, nämlich die, mit der höchsten Amplitude (in der Fachsprache wird diese Stelle auch als *Peak* bezeichnet) in dem Frequenzspektrum. Die anderen Frequenzen unterdrückte ich mithilfe eines Equalizers (siehe Anhang, Bild 2, Seite 19); nur die Frequenzen zwischen 1322 Hz und 1402 Hz (der Peak lag bei ca. 1360 Hz) ließ ich unangetastet (Frequenzspektrum nach der Equalizer-Anwendung siehe Anhang, Bild 3, Seite 20). Da die Frequenzverschiebung bei Geschwindigkeiten um die 50 Stundenkilometer nicht 80 Hz übersteigen sollte, konnte ich nun in den anderen Tonaufnahmen meinen „ausgesuchten“ Peak leicht „wieder finden“. Somit schnitt ich nun nacheinander aus den Tonaufnahmen jeweils das Geräusch des heranfahrenden Autos und das Geräusch des wegfahrenden Autos heraus (siehe Anhang, Bild 4, Seite 21), unterdrückte die störenden Frequenzen und las den Peak ab. Dabei stellte sich jedoch schnell ein weiteres Problem heraus: Zum einen konnte man mit „Adobe Audition“ den Peak nicht sehr genau ablesen. Dies Problem behob ich jedoch schnell, indem ich einfach das Shareware-Programm „Spectrum Analyzer pro Live 2007“ (Siehe Anhang, Bild 5, Seite 22) zur Hilfe nahm. Zum anderen schwankte der Peak jedoch bei einigen Aufnahmen sehr stark (Schlimmstenfalls in einem Bereich von ca. 10-15 Hz). Dieses Problem ließ sich leider nicht beheben, somit musste ich bei einigen Aufnahmen den Mittelwert zwischen dem minimalen und maximalen Peak nehmen. Jedoch erhielt ich letztendlich für alle Geschwindigkeiten plausible Werte, die ich nun in der Auswertung darlegen werde.

<sup>9</sup> Nähere Informationen zu Funktionsweise etc. z.B. unter <http://de.wikipedia.org/wiki/Fourier-Analyse> abrufbar

### 3.2 Auswertung des Experiments / Darlegung der Messergebnisse

In diesem Abschnitt beantworte ich nun die eigentlich zentralen Fragen meiner Facharbeit: Inwiefern lassen sich die Doppler-Formeln im Alltag nachvollziehen? Ist das oben geschilderte Experiment gelungen? Nun – dazu werde ich aus den gemessenen Frequenzverschiebungen zuerst die Geschwindigkeit des Autos errechnen, und diese Werte dann mit den tatsächlichen „Tacho-Werten“ vergleichen. Die Geschwindigkeit des Senders lässt sich einfach durch Umstellen der in Kapitel 2 hergeleiteten Formeln errechnen. Es gilt für das abfahrende Auto (Gleichung 2.2.1.2.1):

$$f_e = \frac{f_s}{1 + \frac{v_s}{c}}$$

$$\frac{f_s}{f_e} = 1 + \frac{v_s}{c}$$

$$\left(\frac{f_s}{f_e} - 1\right) \cdot c = v_s$$

Bzw. für das heranfahrende Auto (Gleichung 2.2.1.1.2):

$$\left(\frac{f_s}{f_e} - 1\right) \cdot (-c) = v_s$$

Um nun einen möglichst „guten“ Wert für  $v_s$  zu bekommen, errechne ich einmal die Geschwindigkeit des Autos mit dem Peak des herannahenden Autos, und einmal mithilfe des Peaks des abfahrenden Autos. Diese beiden Werte addiere ich und teile sie durch den Faktor zwei, um den Durchschnittswert der beiden Geschwindigkeiten zu erhalten. Abschließend rechne ich die Geschwindigkeit in  $\frac{km}{h}$  um, indem ich mit dem Faktor 3,6 multipliziere, da  $1 \frac{m}{s} 3,6 \frac{km}{h}$  entspricht:

$$\begin{aligned} v_s^{Mittelwert} &= \frac{\left(\frac{f_s}{f_e^{herannahend}} - 1\right) \cdot (-c) + \left(\frac{f_s}{f_e^{wegfahrend}} - 1\right) \cdot c}{2} \cdot 3,6 \\ &= c \cdot f_s \left( \frac{1,8}{f_e^{wegfahrend}} - \frac{1,8}{f_e^{herannahend}} \right) \end{aligned}$$

Für  $c$  setze ich  $334,5 \frac{m}{s}$  ein, für die Frequenzen folgende Werte:

<u>Geschwindigkeit</u>	<u>Peak beim herannahenden Auto</u>	<u>Peak beim wegfahrenden Auto</u>
In Ruhe	(1362,3 Hz)	(1362,3 Hz)
30 km/h	Ca. 1393 Hz	Ca. 1332 Hz
40 km/h	Ca. 1398 Hz	Ca. 1320 Hz
50 km/h	Ca. 1410 Hz	Ca. 1314 Hz
60 km/h	Ca. 1425 Hz	Ca. 1303 Hz

Somit erhielt ich folgende Ergebnisse:

<u>Geschwindigkeit laut Tacho</u>	<u>Geschwindigkeit errechnet</u>	<u>Abweichung</u>
30 km/h	26,97 km/h	10,1 %
40 km/h	34,67 km/h	13,325 %
50 km/h	42,50 km/h	15 %
60 km/h	53,89 km/h	10,1833 %

Anhand der Tabelle sieht man, dass die durch die Frequenzabweichungen errechneten Geschwindigkeiten recht gut mit den Tacho-Geschwindigkeiten übereinstimmen. Die Abweichungen von 10-15% Prozent sind nicht allzu gravierend, und reichen vollkommen aus, um die Theorie und die in Kapitel 2 hergeleiteten Formeln letztendlich durch die Praxis als bestätigt anzusehen. Warum jedoch eine Abweichung im Bereich von 10 bis 15 % zu erkennen ist, ist schwer zu sagen – immerhin gab es einige Probleme bei der Messung (siehe Kapitel 3.1) und natürlich sind auch die Tacho-Geschwindigkeiten nicht genau – auch heute noch besitzen die Tachos eine Abweichung von 5-10% von der tatsächlichen Geschwindigkeit des Autos. Um also Messergebnisse zu erhalten, die eine geringere Abweichung von der „wirklichen“ Geschwindigkeit des Autos aufweisen, müsste man die tatsächliche Geschwindigkeit des Autos genauer bestimmen können und auch andere Störfaktoren (Wind, Störgeräusche/Grundrauschen beim Aufnehmen, „Unsauberkeit“ des Huptons, usw.) versuchen zu minimieren.

## 4 Addendum / Abschluss

### 4.1 Relativistischer / optischer Doppler-Effekt<sup>10</sup>

Wie in der Einleitung bereits erwähnt, ist der Doppler-Effekt keinesfalls nur bei akustischen Wellen zu beobachten – viel mehr gilt er bei *allen* Wellenbewegungen (sobald sich Sender oder Empfänger bewegen). Also auch bei elektromagnetischen Wellen, zu

denen ja auch das sichtbare Licht zählt – dies sagte auch bereits Christian Doppler im 19. Jahrhundert voraus. 1929 entdeckte der amerikanische Astronom Edwin Hubble, nachdem er zum ersten Mal das Licht ferner Galaxien spektral zerlegte, dass typische Spektrallinien bekannter Elemente nicht bei den im Labor gemessenen charakteristischen Wellenlängen auftraten, sondern zu längeren Wellenlängen (also zum roten Bereich; rötliches Licht besitzt eine längere Wellenlänge als z.B. blaues Licht) verschoben sind. Hubble dachte damals, dass die Erde ruht, und sich alle anderen Galaxien von uns entfernen, und somit, bedingt durch den Doppler-Effekt, ihre Spektrallinien verschieben. Unter Beachtung der Relativitätstheorie Einsteins ergibt sich jedoch ein anderes Bild: Denn nicht alle Galaxien ent-

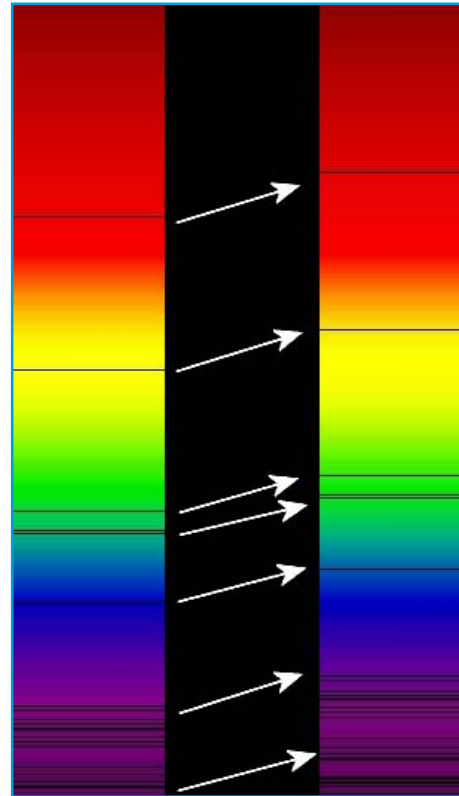


Abbildung 4.1.2: Verschiebung der Spektrallinien in den roten Bereich

fernen sich von *uns*, sondern *alle* entfernen sich *relativ zueinander* (Im Übrigen ist es

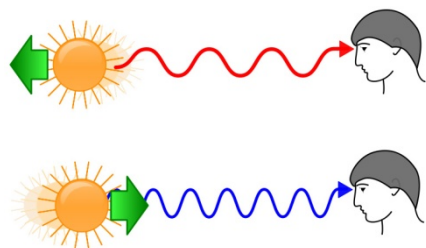


Abbildung 4.1.1: Rot- bzw. Blauverschiebung bei bewegter Lichtquelle

bei Lichtwellen egal, ob sich Empfänger *oder* Sender bewegen – da Licht kein Medium braucht, um sich auszubreiten, und zu dem sich Beobachter oder Sender relativ bewegen könnten). Ungeachtet dessen errechnete Hubble aus der Rotverschiebung eine Fluchtgeschwindigkeit der Galaxien –

und machte die Entdeckung, dass die relative Fluchtgeschwindigkeit umso größer ist, je weiter die Galaxien voneinander entfernt sind. Heutzutage erklärt man dieses Phänomen durch die *Expansion des Universums* (Eine kurze, interessante Zusammenfassung ist unter

<sup>10</sup> Vgl. Grehn – Krause 1998, S. 358

[http://de.wikipedia.org/wiki/Expansion\\_des\\_Universums](http://de.wikipedia.org/wiki/Expansion_des_Universums) erreichbar, weitere Informationen in „Metzler Physik“ (Grehn – Krause 1998) auf Seite 548ff. nachzulesen). Dabei ist jedoch unklar, ob sich das Universum unendlich lange ausdehnen wird, diese Ausdehnung asymptotisch verläuft, oder aber irgendwann zum Stillstand kommt und wieder in eine Kontraktion übergeht.

Die eigentlichen Gründe, *warum* sich die Wellenlängen der Lichtwellen bei einer Relativbewegung verändern und die Formeln für die Frequenzverschiebung sind jedoch schwierig zu erläutern bzw. herzuleiten – denn der Ansatz ist ein anderer als bei den akustischen Wellen. Eine wichtige Rolle spielt dabei die auf Einsteins Relativitätstheorie basierende Zeitdilatation, die einen ruhenden Empfänger E die Wellenberge mit einem größeren zeitlichen Abstand wahrnehmen lässt (da die Lichtgeschwindigkeit  $c \cong 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$  konstant ist). Die exakte Erklärung und Herleitung der Formeln sind jedoch nachzulesen in „Metzler Physik“ (Grehn – Krause 1998) auf Seite 358, bzw. in der Facharbeit von Stefan Schuhladen in Kapitel 3.2, Seite 14ff. (siehe Anhang, Weitere Quellen).

#### 4.2 Abschließendes Fazit

Natürlich kann man in einer schulischen Facharbeit nicht alle Aspekte eines solch umfassenden und interessanten Themas wie das des Doppler-Effekts beschreiben. Aber ich hoffe, einen guten Überblick über das Thema gegeben und es verständlich erklärt zu haben. Kurzum: Meine Hoffnung ist es, dass ich meine in der Einleitung formulierten Ansprüche und Ziele erreicht habe – das wichtigste Ziel, das ich mir in dieser Facharbeit gesetzt hatte, nämlich die Bestätigung der Theorie durch die Praxis, ist zumindest aus meiner Sicht gelungen.

## 5 Anhang

### 5.1 Literaturverzeichnis

- ▶ Dorn, Professor Friedrich, und Bader, Professor Dr. Franz. *Physik - Oberstufe, Band MS*. Stuttgart: Schroedel Schulbuchverlag, 1983.
- ▶ Grehn, Joachim, und Krause, Joachim. *Metzler Physik*. 3. Auflage. Kiel, Neumünster: Schroedel Verlag, 1998.
- ▶ Höfling, Oskar. *Physik - Band II, Teil 1: Mechanik - Wärme*. 10. Auflage. Bd. II. Hamburg: Ferd. Dümmlers Verlag, 1973.
- ▶ *Wikipedia*. <http://de.wikipedia.org/> (Zugriff im Februar 2008).

### 5.2 Weitere Quellen

- ▶ Fries, Benjamin. „Facharbeit. Experimente zum akustischen Dopplereffekt“. [http://benjamin-fries.de/hp/dls/facharbeit\\_dopplereffekt.pdf](http://benjamin-fries.de/hp/dls/facharbeit_dopplereffekt.pdf) (Zugriff im Februar 2008).
- ▶ Heißelmann, Daniel und Vallo, Sebastian. „Facharbeit im Leistungskurs Physik. Nachweis des Doppler-Effektes mit Hilfe von Schallwellen“. <http://www.angelaschule-osnabrueck.de/downloads/facharbeiten/ph/danielsebastian99.pdf> (Zugriff im Februar 2008).
- ▶ Lorenz, Tobias. „Facharbeit im Leistungskurs Physik. Thema: Der Dopplereffekt“. [http://content.grin.com/binary/hade\\_download/16356.pdf](http://content.grin.com/binary/hade_download/16356.pdf) (Zugriff im Februar 2008).
- ▶ Pinkernelle, Jan und Hagedorn, Florian. „Der Dopplereffekt. Geschwindigkeitsbestimmung mit dem PC“. <http://www.tommynet.de/download/fadoppler.pdf> (Zugriff im Februar 2008).
- ▶ Richter, Hendrik. „Der Doppler-Effekt. Erklärung, Herleitung und Überprüfung mit Hilfe von pendelnder Schallquelle und Empfänger“. <http://www.naggel.com/~hendrik/2004/facharbeit.pdf> (Zugriff im Februar 2008).
- ▶ Schuhladen, Stefan. „Facharbeit aus dem Fach Physik. Thema: Der Dopplereffekt – Darstellung von Theorie und Experiment. Dopplereffekt bei Reflexion von Wellen an einem bewegten Reflektor (Messung von Geschwindigkeiten)“. <http://www.abi-null->



vier.net/download.php?url=pdf/facharbeiten/47.pdf (Zugriff im Februar 2008).

### 5.3 Abbildungsverzeichnis

- ▶ Abbildung 2.1.1: Übernommen aus Bader – Dorn 1983, S. 252.
- ▶ Abbildung 2.2.1: Übernommen aus Bader – Dorn 1983, S. 273.
- ▶ Abbildung 2.2.2: Übernommen aus [http://commons.wikimedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://commons.wikimedia.org/wiki/Doppler_effect).
- ▶ Abbildungen 3.1.1 und 3.1.2: Selbst geschossene Fotos.
- ▶ Abbildungen 4.1.1 und 4.1.2: Übernommen aus [http://commons.wikimedia.org/wiki/Doppler\\_effect](http://commons.wikimedia.org/wiki/Doppler_effect).
- ▶ Abbildungen in Kapitel 5.4: Selbst gemachte Screenshots.

---

## 5.4 Abbildungen









---

## 5.5 Schülererklärung