

Physik Praktikum 12.2

Zum Thema Dopplereffekt

Zeit: Freitag, den 17.1.03, 4. und 5. Schulstunde

Ort: Tuskulumweg in St. Blasien (direkt vor dem Post-Sportplatz)

Teilnehmer: Paulius Ignataviciu, Johannes Maier, Marius Rabold

Struktur

1. Theorie
2. Versuchsvorbereitung
3. Versuchsdurchführung
4. Auswertung
5. Schlussbemerkung

1 Theorie

Wir werden die theoretische Betrachtung für unseren Versuch durchführen.

Den Dopplereffekt, der nach einem Physiker Christian Doppler (1803 – 1853) benannt ist, kennt sogar jedes kleine Kind. Wenn das Auto sich auf uns zubewegt, hören wir einen höheren Ton als wenn es an uns vorbeifährt. Der Ton wird aber tiefer, wenn das Auto sich von uns fortbewegt. Wir haben uns mit diesem Sachverhalt in unserem Versuch auseinandergesetzt.

Es gibt zwei Möglichkeiten den Dopplereffekt zu untersuchen. Die erste Möglichkeit ist der bewegte Empfänger (in unserem Fall das Mikrofon) und der ruhende Sender (in unserem Fall das hupende Auto). Die zweite Möglichkeit ist das Experiment mit dem bewegten Sender und mit dem ruhenden Empfänger. Wir haben uns für die zweite Möglichkeit entschieden, denn das Aufnehmen mit dem Laptop im fahrendem Auto wäre zu umständlich gewesen und hätte noch mehr Fehlerquellen verursacht, wie z.B. die Lautstärke des Motors.

Wir betrachten nun die Abbildung Nr.1:

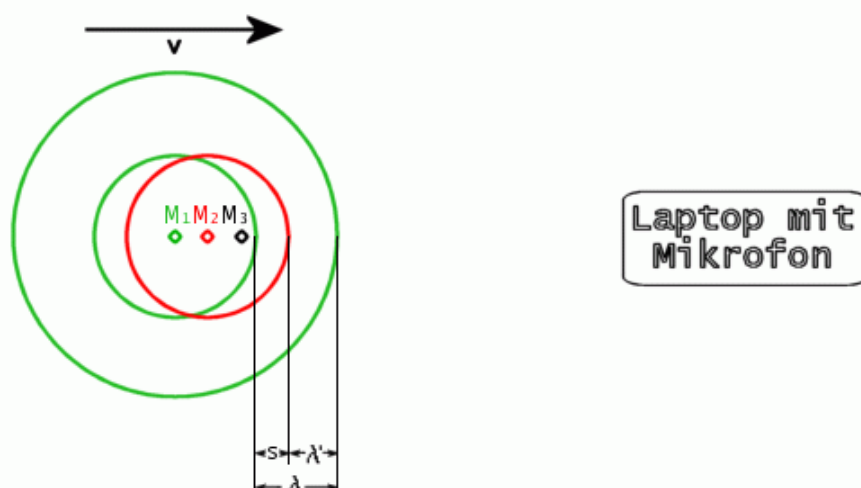


Abb.1

Ein Sender (Das hupende Auto) bewegt sich auf den Empfänger (Laptop und Mikrofon) zu. Zum Zeitpunkt $t = 0$ s fährt das Auto in Richtung des Empfängers mit der Geschwindigkeit v . Im Punkt M_1 startet eine Schallwelle mit einer bestimmten Phase (z.B. mit einem Wellenberg). Zum

Zeitpunkt $t = 1 T$ (T – die Periodendauer) hat der Wellenberg die Strecke λ zurückgelegt. Der Sender hat in der Zeit $t = 1 T$ die Strecke $s = vT$ zurückgelegt und befindet sich im Punkt M_1 . Dort sendet er auch eine neue Schallwelle aus. Zum Zeitpunkt $t = 2 T$ ist die grün gezeichnete Schallwelle auf einen Radius von 2λ angewachsen. Die rotgezeichnete Welle hat zu diesem Zeitpunkt einen Radius von 1λ . Der erste Wellenberg hat relativ zum zweiten Wellenberg, der nach $1 T$ vom Sender gestartet wurde, den Abstand $\lambda' = \lambda - s$. Dieses Kreissystem bewegt sich unabhängig vom Sender mit der Schallgeschwindigkeit $c = 340 \text{ m/s}$ auf den Empfänger zu. Deswegen hören wir den Ton nicht mit der eigentlichen Frequenz $f = \frac{c}{\lambda}$, sondern mit der Dopplerfrequenz

$$f' = \frac{c}{\lambda'} \Rightarrow \lambda' = \frac{c}{f'}$$

λ' ist aber auch der Abstand zwischen dem ersten (grüne Kreiswelle) und dem zweiten Wellenberg (rote Kreiswelle):

$$\lambda' = \lambda - s = \lambda - vT = \frac{c}{f} - \frac{v}{f}$$

Setzt man die Formeln gleich, bekommt man eine neue Formel:

$$\frac{c}{f'} = \frac{(c-v)}{f}$$

Teilt man beiden Seiten durch c , bekommt man:

$$\frac{1}{f'} = \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}{f} \Rightarrow f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

f' ist die neue Frequenz, die der Empfänger wahrnimmt, wenn sich das Auto auf ihn zu bewegt. Bewegt sich das Auto aber vom Empfänger fort, so ist v als negativ zu betrachten. Aufgrund unserer theoretischen Überlegungen kann man den Sachverhalt, den wir am Anfang angesprochen haben in

einer Formel zusammenfassen:

$$f' = f \frac{1}{1 \pm \frac{v}{c}}$$

Der Vorzeichenwechsel zeigt an, ob das Auto sich auf den Empfänger zubewegt, oder ob es sich vom Empfänger entfernt. Aus dieser Formel kann man, wenn man die Dopplerfrequenz weiß, die Geschwindigkeit des Autos berechnen:

1. Das Auto fährt zum Empfänger:

$$f' = f \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \Rightarrow 1 - \frac{v}{c} = \frac{f}{f'} \Rightarrow \frac{v}{c} = -\frac{f}{f'} + 1 \Rightarrow v = \left(1 - \frac{f}{f'}\right) \cdot c$$

2. Das Auto fährt vom Empfänger weg:

$$f' = f \frac{1}{1 + \frac{v}{c}} \Rightarrow 1 + \frac{v}{c} = \frac{f}{f'} \Rightarrow \frac{v}{c} = \frac{f}{f'} - 1 \Rightarrow v = \left(\frac{f}{f'} - 1\right) \cdot c$$

v kann auch mit der Formel $\Delta f = f_1 - f = \frac{f}{1 - \frac{v}{c}} - f = f \left(\frac{c}{c-v} - 1\right) = f \left(\frac{c - c + v}{c-v}\right) = f \frac{v}{c-v}$

$$c - v \approx c \Rightarrow v = \frac{\Delta f \cdot c}{f}$$

2.1 Materialliste

- Notebook
- Auto mit Fahrerin (Annika Maier)
- Mikrofon und Acoustica (Computerprogramm für Tonaufnahmen und -analysen)
- Notizblock
- Holztisch

2.2 Versuchsaufbau

Wir haben uns in der zur Verfügung stehenden Zeit mit unseren Materialien und der spontan hilfsbereiten Annika zu der Straße am Postsportplatz begeben. Dort angekommen haben wir unser Equipment aufgebaut. Wir haben das Notebook auf den Holztisch am Rand der Straße gestellt und an diesem ein Mikrofon angeschlossen. Bei unserer Vorbereitung auf dieses Experiment haben wir zuerst als Basis das Sound Aufnahme- und Analyseprogramm Acoustica auf dem Notebook installiert. Paulius fuhr mit Annika im Auto um ihr dann die notwendige Geschwindigkeit zu vermitteln und um ihr dann tatkräftig hupend zur Seite zu stehen. Johannes war als unser Computerexperte für das Programm und die Einstellungen zuständig. Marius hatte die Aufgabe mit dem Mikrofon die Tonaufnahme festzuhalten. Wir hatten uns auf drei Versuchsansätze geeinigt. So fuhren Annika und Paulius mit 60 km/h an und fuhren die Hupe gedrückt an uns vorbei. Marius musste mit dem Mikrofon die Fahrbewegung mitmachen und hielt so erst das Mikrofon in Richtung entgegenkommendes Auto und schwenkte dann bei dessen Vorbeifahren mit dem Mikrofon während Johannes den technischen Teil am Notebook übernahm. Wir unternahmen noch weitere Messungen mit anderen Geschwindigkeiten, doch auch diese zu analysieren würde den Rahmen dieses Praktikumsberichtes sprengen, nicht zuletzt, weil die Berechnung des Wavelets beträchtliche Zeit in Anspruch nahm.

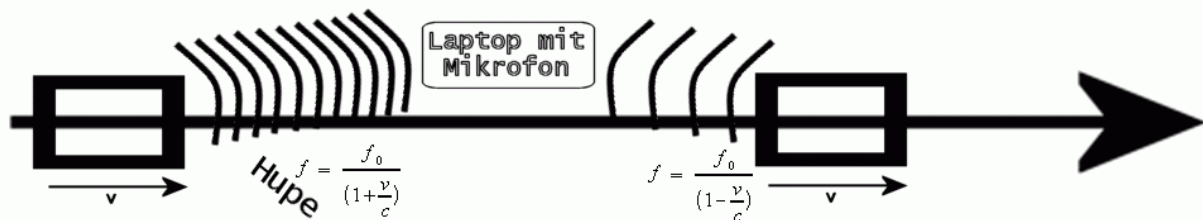
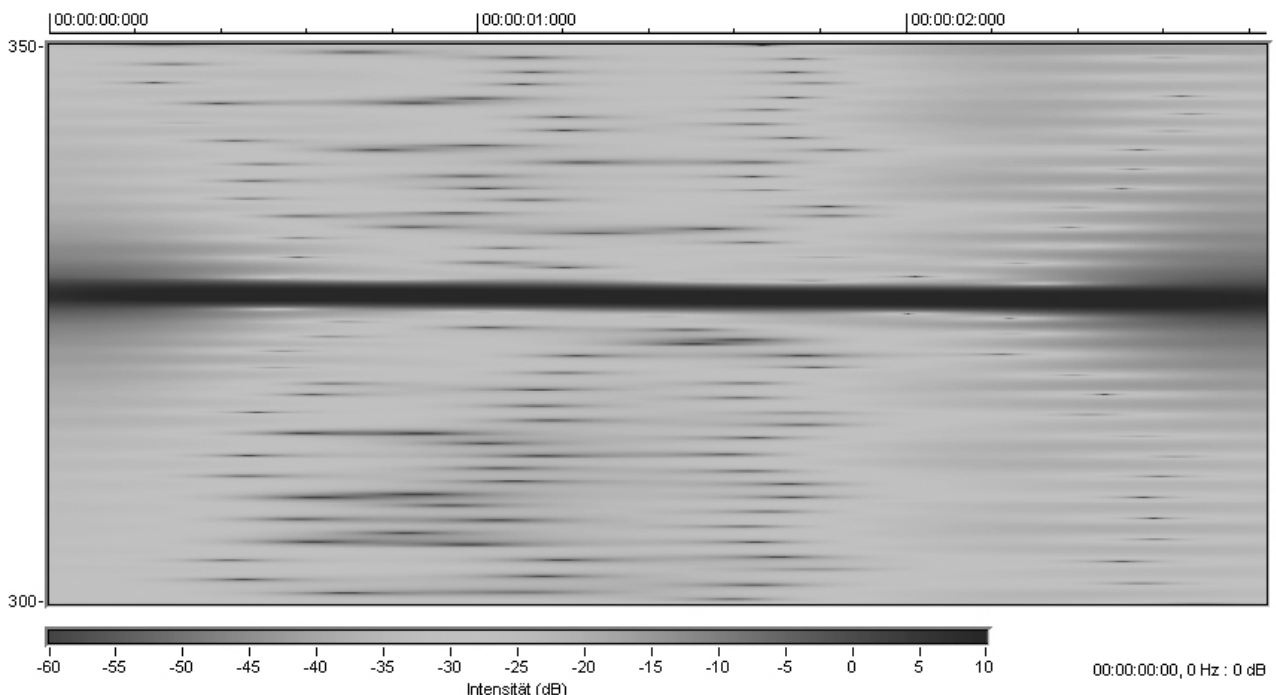


Abb. 2

3.1 Vorversuch – Bestimmung der Hupenfrequenz

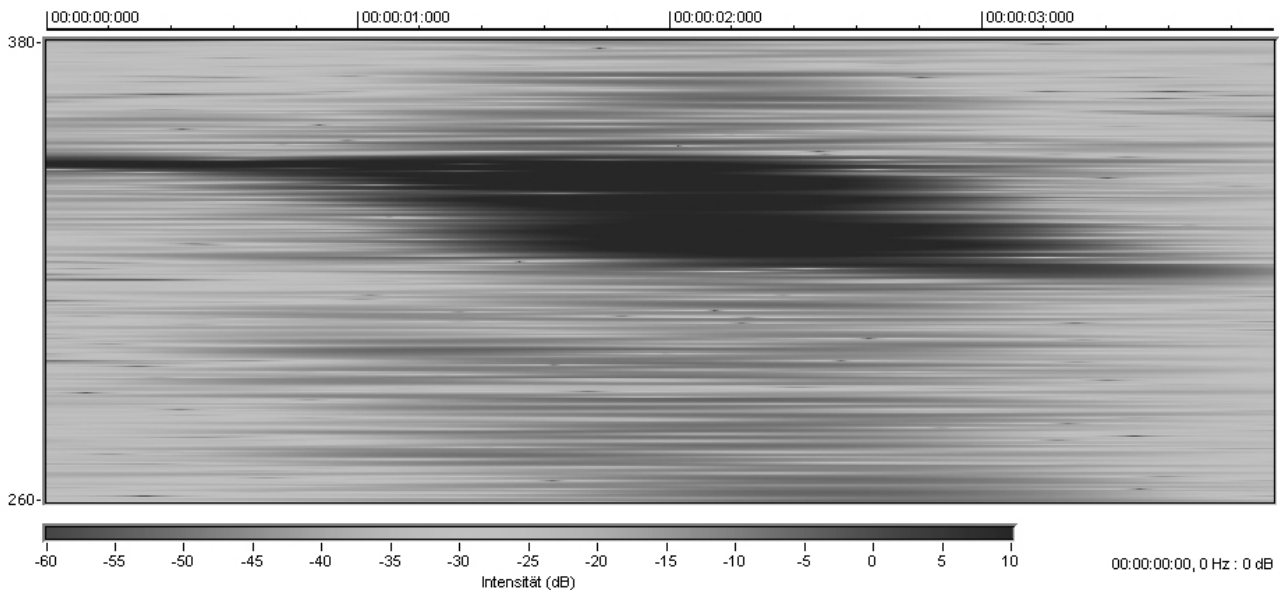
Wir nahmen die Hupe auf, während das Auto sich in Ruhe befand. Das mit Acoustica von der Aufnahme datei erzeugte Wavelet sieht wie folgt aus:



Nach der Bestimmung des Kanalzentrums, wo der Schall am lautesten ist, ergeben sich 326 Hz ± 0.5 Hz

3.2 Hauptversuch

Wenn nun der Wagen am Mikrofon vorbeibraust ergibt sich eine Waveletanalyse wie folgt:



Der Wagen ist mit der Geschwindigkeit $v = 60 \text{ km/h} = 50/3 \text{ m/s}$ gefahren. Der Fehler beim Ablesen des Tachos liegt bei ungefähr 5% .

$$f = 326 \text{ Hz}$$

Ablesefehler ca. 0,15% dieser Fehler ist bei unseren Rechnungen zu vernachlässigen, denn er ist sehr gering.

a) Ermittlung der gefahrenen Geschwindigkeit über den Frequenzunterschied

Der theoretische Frequenzunterschied :

$$\Delta f = |f - f'| = \left| f - f \frac{1}{1 - \frac{v}{c}} \right| = \left| 326 \text{ Hz} - \frac{326 \text{ Hz}}{1 - \frac{50/3 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}} \right| \approx 17 \text{ Hz}$$

Δf hat ein Fehler von ca. 5 %

Der gemessene Frequenzunterschied:

$$f_1 = 343 \text{ Hz} \quad f_1 \rightarrow \text{Frequenz von der Hupe bei der Anfahrt}$$

$$f_2 = 315,5 \text{ Hz} \quad f_2 \rightarrow \text{Frequenz von der Hupe beim Entfernen}$$

$$\Delta f = \frac{f_1 - f_2}{2} = 13,75 \text{ Hz} \Rightarrow v = \frac{\Delta f \cdot c}{f} = 13,75 \text{ Hz} \cdot \left\{ \frac{340 \text{ m/s}}{326 \text{ Hz}} \right\} \approx 14,34 \text{ m/s}$$

$$v \approx 51,62 \text{ km/h}$$

v hat einen Fehler von ca. 5% .Dieser Wert ist ziemlich ungenau, denn die Formel beinhaltet die Aussage, dass $c - v \approx c$. Er schweift auch von dem theoretischen Wert der gemessenen Geschwindigkeit ab.

Der gemessene Frequenzunterschied unterscheidet sich vom theoretischen Frequenzunterschied um $17 \text{ Hz} - 13,75 \text{ Hz} = 3,25 \text{ Hz}$. Das macht eine Abweichung von ca. 20 % aus.

Deswegen werden wir versuchen die gefahrene Geschwindigkeit über f_1 und f_2 zu berechnen.

b) Ermittlung der gefahrenen Geschwindigkeit über die Frequenzen vor und nach dem Vorbeifahren

1. Berechnung von v über $f_1 \rightarrow \text{Frequenz von der Hupe bei der Anfahrt} = 343 \text{ Hz}$

$$v = \left(1 - \frac{f}{f'} \right) \cdot c = \left(1 - \frac{326 \text{ Hz}}{343 \text{ Hz}} \right) \cdot 340 \text{ m/s} \approx 17 \text{ m/s} \approx 61 \text{ km/h}$$

Der Fehler von v ist sehr gering (ca. 0,15%), weswegen es uns ein sehr gutes Ergebnis zu sein scheint.

Dies führt auf eine genaue Messung von f_1 zurück. Der theoretische Wert von f_1 liegt nämlich bei:

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)} = \frac{326 \text{ Hz}}{\left(1 - \frac{50 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}\right)} \approx 343 \text{ Hz}$$

f' hat einen Fehler von ca. 5%, der jedoch aufgrund der ziemlich genauen Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert, der einen sehr geringen Ablesefehler beinhaltet, vernachlässigt werden kann.

2. Berechnung von v über $f_2 \rightarrow$ Frequenz von der Hupe beim Entfernen = 315,5 Hz

$$v = \left(\frac{f}{f'} - 1\right) \cdot c = \left(\frac{326 \text{ Hz}}{315,5 \text{ Hz}} - 1\right) \cdot 340 \text{ m/s} \approx 11,3 \text{ m/s} \approx 41 \text{ km/h}$$

Der Fehler von v ist auch wie bei der Berechnung Nr.1 sehr gering (ca. 0,15%), aber der Wert weicht vom theoretischen Wert ab.

=> Abweichung ca. 33,5% Fehler bei ca. 33,5% + 0,15% => 33,65%

Das lässt sich auf die Abweichung der gemessenen Frequenz vom theoretischen Wert von f_2 zurückführen. Der theor. Wert liegt bei:

$$f' = \frac{f}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \frac{326 \text{ Hz}}{\left(1 + \frac{50 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}}\right)} \approx 311 \text{ Hz}$$

f' hat einen Fehler von ca. 1,4%. Dieser kleine Fehler macht im Endeffekt eine Abweichung von ca. 33,65% aus.

4.1 Besonderheiten / Vorgehensweise bei der Auswertung

Zunächst gingen zahlreiche Messversuche in die Hose aufgrund von Missverständnissen und Kommunikationsproblemen. Als wir dann dennoch einige Versuchsergebnisse hatten waren wir zunächst optimistisch, bis es dann an die Auswertung ging, wo eine Frage die nächste aufwarf. Wir wollten uns mit der Methode der Praktikanten zwei Jahre zuvor, einen Mittelwert aus einem Frequenzbereich von über 100 Hz Breite zu bilden, nicht zufrieden geben, da uns diese zu ungenau war. Nach langem Überlegen hatten wir eine Methode gefunden, mehrere durchaus seriöse Messwerte zu erzielen.

Wir bildeten den Mittelwert zwischen der oberen und unteren Grenze des lautesten Frequenzbereiches, der sich zwar optisch nicht mehr differenzieren lies, jedoch mit Hilfe der Dezibelanzeige für den sich unter dem Mauszeiger befindlichen Bildpunkt festzustellen war. Dies funktierte sowohl für die Grundfrequenz (Standaufnahme der Hupe) als auch für die Frequenz des auf das Mikrofon zukommende Auto ganz gut (Abweichung 0.2% bzw. 0.9%). Bei den Werten für die Frequenz beim Wegbewegen des Autos gab es jedoch eine Abweichung von über 5% was uns für eine digitale Analyse mit dem Computer einfach zu ungenau war. Darauf fanden wir im Konfigurationsfeld für die Waveletanalyse, dem Hilfswerkzeug des Programmes Acoustica, das wird verwendet hatten einen Parameter "Kohärenzzeit", der zwar die Rechenzeit um ein vielfaches verlängerte (Das Wavelet mit dem wir arbeiteten war das Resultat von fast einer Stunde Berechnungen des Computers), was jedoch in einer weit differenzierteren Grafik resultierte aus der wir den Wert problemlos direkt ablesen konnten ohne mit einem Ablesefehler größer als 0.5 Hz zu rechnen, der sich auch nicht durch mehrere Messungen minimieren lässt, da er allein auf das Fehlen von Dezimalen in der Waveletanalyse von Acoustica zurückführen lässt.

4.2 Auswertung

Aufgrund der bei der Fehlerangabe und Besonderheiten / Vorgehensweise bei der Auswertung angesprochenen Sachverhalte halten wir dieses Ergebnis für unrealistisch.

Der Versuch ist uns aber gut gelungen, und wir sind zu einem Ergebnis mit einem kleinen Fehler

gekommen. (Hauptversuch b); 1.)

4.3 Fehlerrechnung

Da wir nicht so viel Messwerte hatten, haben wir uns für eine einfache Fehlerrechnung entschieden, die Herr Rudolf im Unterricht behandelt hat. Die Abweichung des gemessenen Wertes (GW) vom theoretischen Wert (TW) wird auf folgende Art und Weise berechnet :

$$\frac{|TW - GW|}{TW} \cdot 100 \%$$

Die Fehlerfortpflanzung:

Beim Multiplizieren und beim Dividieren werden die Prozente addiert.

Die detaillierte Fehlerrechnung haben wir in das Protokoll nicht miteinbezogen, weil diese einfache Rechnung überflüssig gewirkt hätte. Sie wurde aber sachgemäß durchgeführt, und die Ergebnisse wurden korrekt aufgeschrieben.

4.4 Fehlerquellen

1. Nichtkonstante Geschwindigkeit des Autos, ungenaue Anzeige des Tachometers (Ablesefehler?) - Zu frühes Abbremsen des Autos (Unsererseits favorisierte Fehlerquelle hinsichtlich der großen Abweichung der Messwerte vom theoretischen Wert beim Wegbewegen vom Empfänger)
2. Da sich die Hupe vorne am Auto befindetet nimmt die Lautstärke der Hupe beim Wegfahren des Autos schneller ab. Bei niedriger Lautstärke leidet wiederum aufgrund von Nebengeräuschen die Messgenauigkeit.
3. Der Fehler bei der Auswertung des Wavelets ist vernachlässigbar, da er im Bereich eines halben Herzes angesetzt werden kann.
4. Aufzeichnungsfehler (schlechtes Mikrofon, schlechte Verkabelung), der allerdings minimal und so im Vergleich zu anderen Fehlerquellen vernachlässigbar ist.

5. Schlussbemerkung

Uns allen hat das Praktikum auf der einen Seite zwar Arbeit bereitet, doch war es eine willkommene Abwechslung zum Unterricht und ein interessanter Einblick in wissenschaftliche Gefilde. Falls dies einer der Geschädigten lesen sollte möchten wir uns selbstverständlich für die peinliche Lärmbelästigung entschuldigen, und versprechen, dass dies zumindest von uns durchgeführt, nicht mehr vorkommen soll.

Wir möchten uns auch bei Annika Maier bedanken, die so freundlich war, sowohl ihr Auto und ihre Fahrerkünste, als auch ihre Geduld zur Verfügung zu stellen. Desweiteren möchten wir uns noch bei <http://www.OpenOffice.org> bedanken, die es uns ermöglicht haben dieses Protokoll zu erstellen, ganz ohne ein Programm von Microsoft benutzen zu müssen.

Alsdann, Paulius Ignataviciu, Johannes Maier, Marius Rabold

Quellen

Experiment durchgeführt an Anlehnung an das Praktikum des Physik LK 12.1 2000
<http://www.t-online.de/home/EikeBiehler/prakt2.htm>

Hilfsmittel Shareware Audiotbearbeitungsprogramm Acoustica von www.AconAS.de