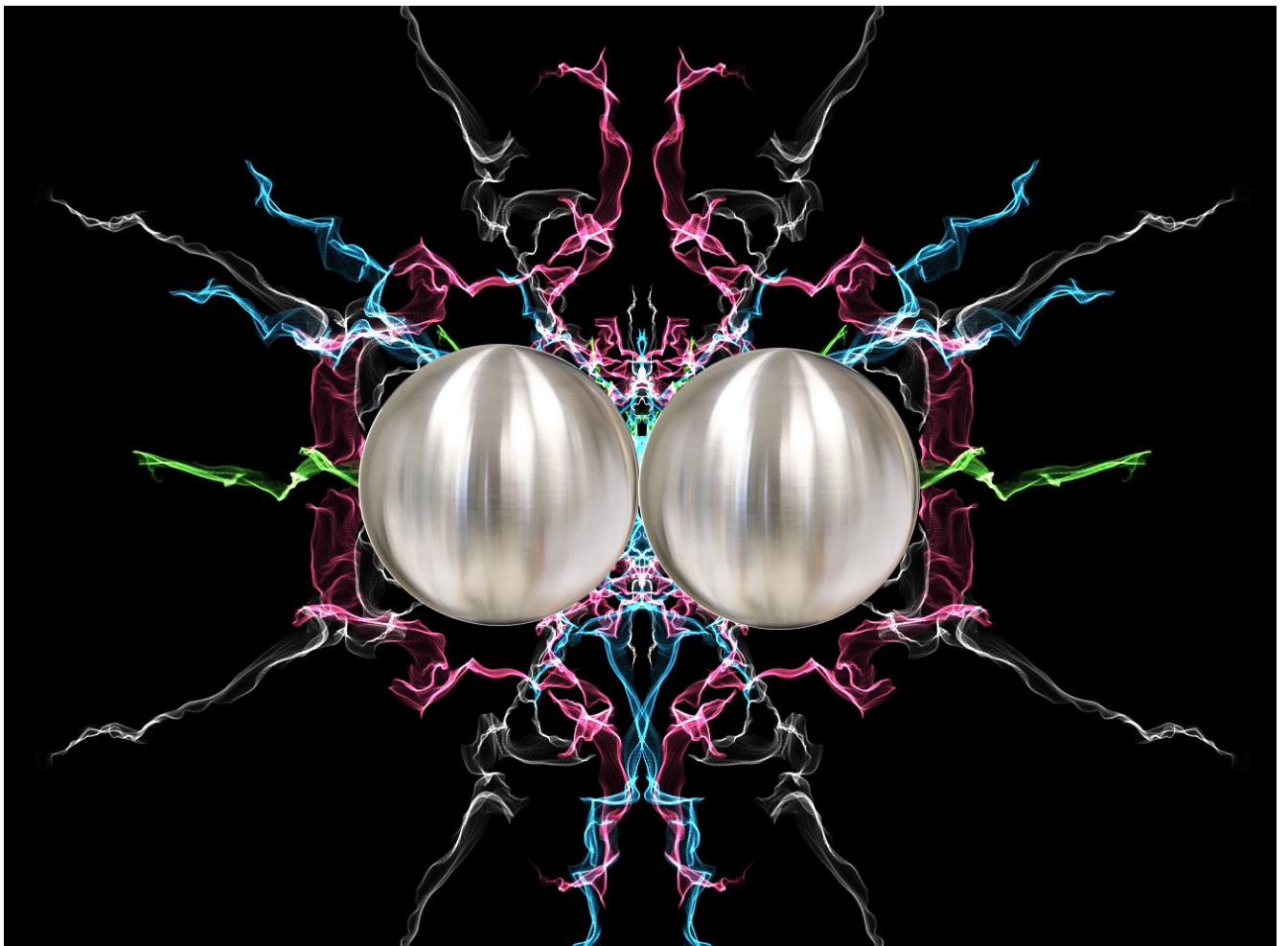


## 5. Prüfungskomponente

Projekt „Ball Sound – Wie entwickelt sich der Ton, der beim Zusammenstoß zweier Metallkugeln entsteht?“

Erarbeitet von Leonard Hackel und  
Niklas Schelten



## Einleitung



1.1 Ellipsoiden

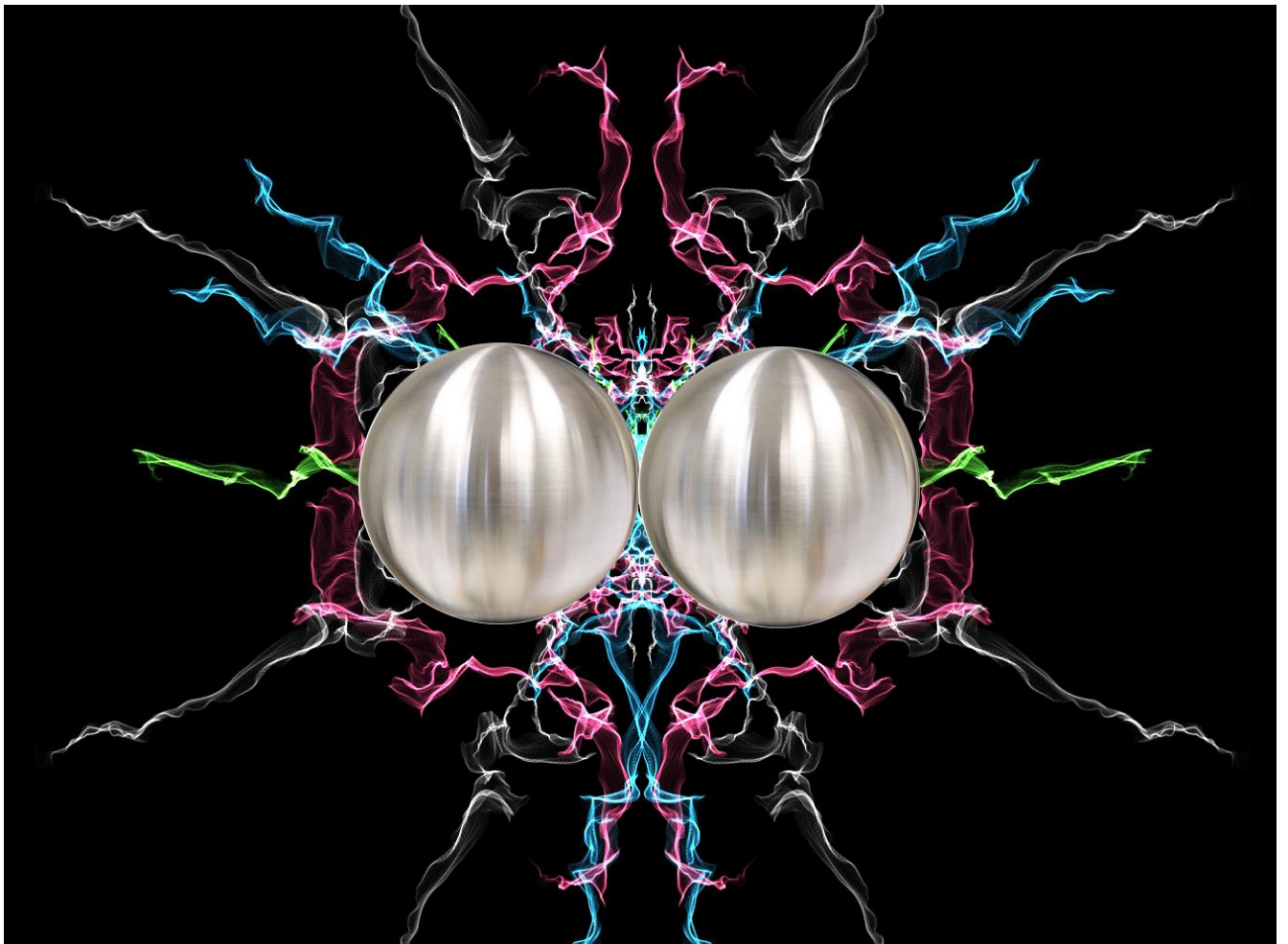
Diese ellipsoiden Magneten dürften jedem bekannt sein. Wenn man sie in die Luft wirft, dann ziehen sie sich gegenseitig an und erzeugen einen charakteristischen Ton. Was viele nicht wissen, ist, dass ein ähnlicher Ton bei normalen Metallkugeln entsteht, wenn man sie leicht aneinander stößt. Anders als bei den obigen Magneten ist der Ton nicht so langanhaltend und auch gleichmäßiger.

Genau das Erforschen dieses Tons war 2014 das vierte Projekt im IYPT Wettbewerb (International Young Physicists Tournament). Da wir uns sehr für dieses Thema interessieren, haben wir uns entschieden zusammen mit Paul Hagemann eine Jugend Forscht Arbeit dazu zu verfassen. Aufgrund der Tatsache, dass Paul lieber eine 5. Prüfungskomponente in dem Fach Informatik machen wollte, sind wir jetzt nur noch zu zweit. Unsere Ergebnisse haben wir dann mit Ergebnissen der Finalisten des IYPT's verglichen. Des Weiteren haben wir sie nach Recherchen ergänzt um eine möglichst umfassende Antwort auf unsere Problemfrage geben zu können.

Im Folgenden haben wir unsere Forschungsarbeit für Jugend Forscht in der Landesebene eingebunden.

Jugend Forscht  
Projekt „Ball Sound – Die Entstehung  
und Entwicklung des Geräusches beim  
Zusammenführen zweier Metallbälle“

Erforscht von Leonard Hackel,  
Paul Hagemann und Niklas Schelten



## Inhalt

1. Fragestellung, Ziele und Zusammenfassung
2. Versuchsaufbau
3. Versuchsauswertung
4. Physikalische Betrachtung
  - a. Basketballmodell
  - b. Verallgemeinerung
5. Simulation
6. Ausblick
7. Fehlerquellen, Ergebnis und Danksagung
8. Quellenverzeichnis

## Fragestellung

Original: „When two hard steel balls, or similar, are brought gently into contact with each other, an unusual ‘chirping’ sound may be produced. Investigate and explain the nature of the sound.”

Übersetzung: „Wenn zwei Kugeln aus Stahl oder einem ähnlichen Material aneinander geführt werden, gibt es ein zwitscherndes Geräusch. Erkläre und erforsche die Herkunft des Geräusches.“

Die Fragestellung ist das vierte Problem des internationalen Physik Wettbewerbs IYPT vergangenen Jahres, International Young Physicists Tournament, weshalb sie in Englisch gestellt ist.

## Ziele

Ziel unserer Forschung ist es natürlich diese Fragestellung zu beantworten sowie einen Versuchsaufbau zu entwickeln, der es uns ermöglicht unsere Ergebnisse möglichst gut zu reproduzieren. Wir konzentrieren uns hierbei auf das Phänomen bei Metallkugeln mit genau einer Größe.

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden wir den oben schon angesprochenen Ton untersuchen, indem wir einen möglichst effizienten Versuchsaufbau vorstellen und an Hand der Versuchsergebnisse den Ton in seiner Amplitude und seiner Schwingungsfrequenz mathematisch beschreiben. Danach versuchen wir den Ton mit Hilfe verschiedener physikalischer Modelle zu erklären, die wir dann auf eine allgemeinere Ebene bringen und den Zusammenhang zwischen der Art der rücktreibenden Kraft und der Eigenschaft des Tones untersuchen.

## Grundsätzliche Beschreibung des Tons

Den gesamten Ton nennen wir „Chirp“. Die einzelnen Töne nennen wir im Folgenden „Peaks“. Wir gehen davon aus, dass die einzelnen Peaks genau dann entstehen, wenn die Kugeln aufeinandertreffen. Das geschieht dadurch, dass sie zunächst durch die Hände oder eine andere zurücktreibende Kraft zusammengedrückt werden und dann eine Impulsübertragung (mit Energieverlust) stattfindet. Daraufhin werden die Kugeln wieder ausgelenkt und wieder zusammengedrückt, sodass wieder ein Peak entsteht. Somit haben wir eine große Anzahl von Peaks, die den Ton ausmachen. Durch den Energieverlust wird die Amplitude kleiner, d.h. der Ton an sich leiser und die Zeitabstände verringern sich.

## Versuchsaufbau



2.1 Versuchsaufbau

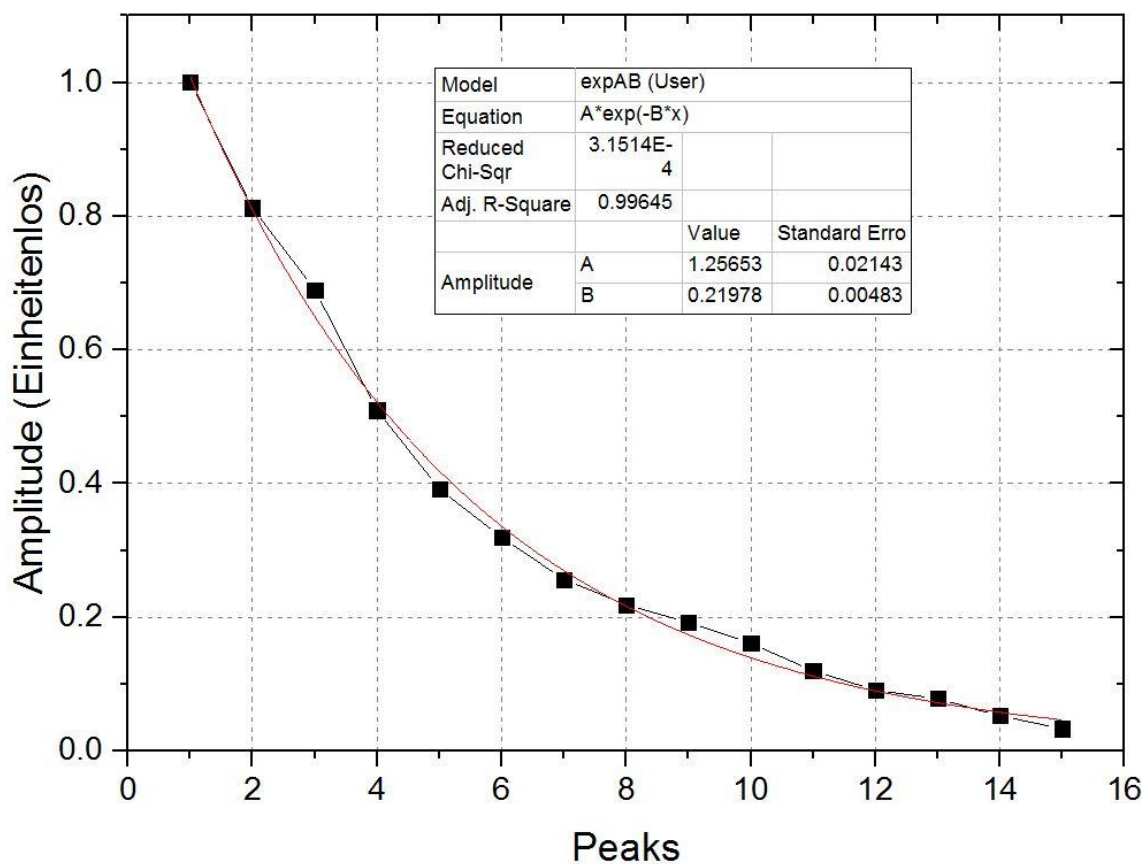
Unser Versuchsaufbau basiert auf zwei Federn, die unsere Hand simulieren und die beiden Kugeln gegeneinander drücken. Damit die Kugeln nicht zur Seite herauspringen werden die Kugeln an zwei Leitschienen geführt. An beiden Seiten sind Kreuzmuffen, die zum einen die Federn festhalten und zum anderen die Schienen stabil halten. Um den entstehenden Ton besser reproduzieren zu können, haben wir uns mit Strichen auf den Schienen markiert wie weit wir die Kugeln auslenken. Unser Mikrofon ist ein normales Standmikrofon, welches wir mit einem Trichter aus Papier versehen haben. Dadurch ist es uns möglich, Umgebungsgeräusche herauszufiltern und die Amplitude des eigentlichen Tons zu erhöhen.

## Versuchsauswertung

Wie beim Versuchsaufbau schon beschrieben haben wir das Mikrofon auf die Kugeln gerichtet und dann die Kugeln bis zu den genannten Strichen ausgelenkt. Den entstehenden Ton haben wir mit dem Programm Audacity aufgenommen und dann analysiert. Um eventuelle Messfehler zu verringern, haben wir mehrere Messungen durchgeführt und den Durchschnitt dieser genommen.

Dadurch erhalten wir die folgenden beiden Graphen, die wir weiter unten genauer erläutern. Die Messergebnisse legen nahe, dass sich insbesondere zwei Größen während eines Chirps verändern: die Amplitude und der zeitliche Abstand zwischen zwei Peaks.

Bei den folgenden Graphen sind die Linien zwischen den Punkten nur zur Veranschaulichung eingetragen, gemessen wurden nur (ganzzahlige) Anzahlen von Peaks.



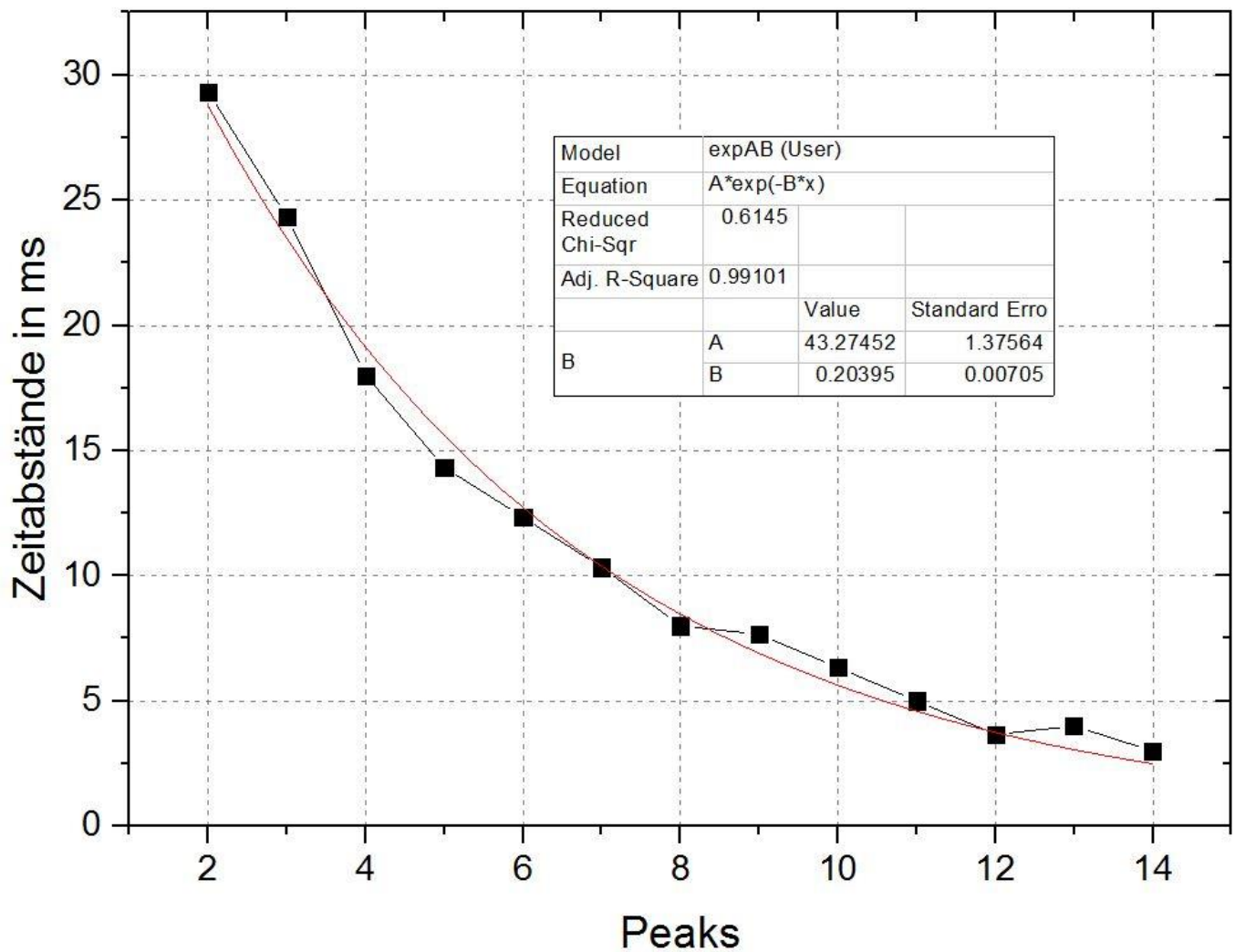
3.1 Amplituden abhängig von den Peaks

Hier sieht man zunächst die Amplitude in Abhängigkeit zu der Anzahl der Peaks.

Die Amplitude ist bei elektronischer Auswertung einheitenlos.

Der Fit ergibt die Funktionsgleichung  $y = 1,26 \cdot e^{-0,22x} = 1,26 \cdot 0,8^x$ . Dabei gehen wir von einer exponentiellen Funktion aus, da wir die Funktion als gedämpfte Schwingung auffassen und da diese ein sehr gutes Bestimmtheitsmaß von 0,996 hat. Somit verringert sich die Amplitude bei jedem Peak um den Faktor 0,8 und 1,26 ist die berechnete Startamplitude.





4.1 Zeitabstände abhängig von den Peaks

Dies ist der Graph mit den Zeitabständen als Funktionswert. Auch von diesen nehmen wir an, dass sie exponentiell verlaufen, da es sich wie oben erwähnt um eine gedämpfte Schwingung handelt. Der Zeitabstand zwischen den Peaks verringert sich bei jedem Peak um ungefähr  $0,82\text{ms}$ , wobei der Startwert ungefähr  $43,27\text{ms}$  beträgt. An Hand der Abnahmefaktoren lässt sich schlussfolgern, dass die Abnahmefaktoren bei den Zeitabständen und bei der Amplitude ungefähr gleich sind ( $0,8$  und  $0,82$ ). Der Unterschied von  $0,02$  lässt sich zum Großteil auf Messungenauigkeiten zurückführen. Um die Messwerte jetzt noch physikalisch zu belegen, haben wir folgende Gleichungen aufgestellt:

$$t_n = \delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n$$

$$t_{max} = \frac{1}{1-b} \cdot \delta_1$$

$$\Rightarrow t_n = t_{max} \cdot (1 - b^n)$$

$$\Leftrightarrow 1 - \frac{t_n}{t_{max}} = b^n$$

$$\Leftrightarrow n = \frac{\log(1 - \frac{t_n}{t_{max}})}{\log b}$$

$$y_n = a \cdot y_{n-1}$$

$$\Leftrightarrow y_n = a^n \cdot y_0$$

$$\Leftrightarrow \frac{y_n}{y_0} = a^n$$

$$\Leftrightarrow \frac{\log \frac{y_n}{y_0}}{\log a}$$

Zunächst berechnen wir die Gesamtzeit aus den einzelnen Zeitabständen, hier mit  $\delta$  benannt. Da wir mit jedem Peak die Zeit mit dem Faktor  $b$  multiplizieren ( $1 > b > 0$ ), erhalten wir eine geometrische Reihe, sodass wir die Gesamtzeit in Abhängigkeit von dem Abnahmefaktor  $b$ , der jeweiligen Anzahl der Peaks  $n$  und dem Startwert des Zeitabstandes  $\delta_1$  darstellen können. Durch diese Gesamtzeit  $t_{max}$  und dem Faktor  $b$  können wir also die Zeit zu einem beliebigen Schritt  $n$  berechnen. Wie man schon an den Messwerten erkennt, ist ein Faktor von 0,82 für  $b$  realistisch. Nun formen wir per Logarithmus nach  $n$  um, da  $n$  die einzige Gemeinsamkeit in den Formeln sowohl für den Zeitabstand als auch die Amplitude ist. Die Amplitude, hier  $y_n$ , stellen wir in der ersten Zeile rekursiv dar, ausgehend von einem Abnahmefaktor  $a$ . Damit ergibt sich dann die explizite Formel  $y_n = a^n \cdot y_0$  wobei  $y_0$  der Startwert ist.

Auch hier lösen wir dann nach  $n$  auf, damit wir die Formeln über das  $n$ , die Anzahl der Peaks, gleichsetzen können.



Gleichsetzung:

$$\frac{\log \frac{y_n}{y_0}}{\log a} = \frac{\log(1 - \frac{t_n}{t_{max}})}{\log b}$$

$$\Leftrightarrow \log \frac{y_n}{y_0} = \frac{\log a}{\log b} \cdot \log(1 - \frac{t_n}{t_{max}})$$

$$\Leftrightarrow \log \frac{y_n}{y_0} = \log((1 - \frac{t_n}{t_{max}})^{\frac{\log a}{\log b}})$$

$$\Leftrightarrow \frac{y_n}{y_0} = (1 - \frac{t_n}{t_{max}})^{\frac{\log a}{\log b}}$$

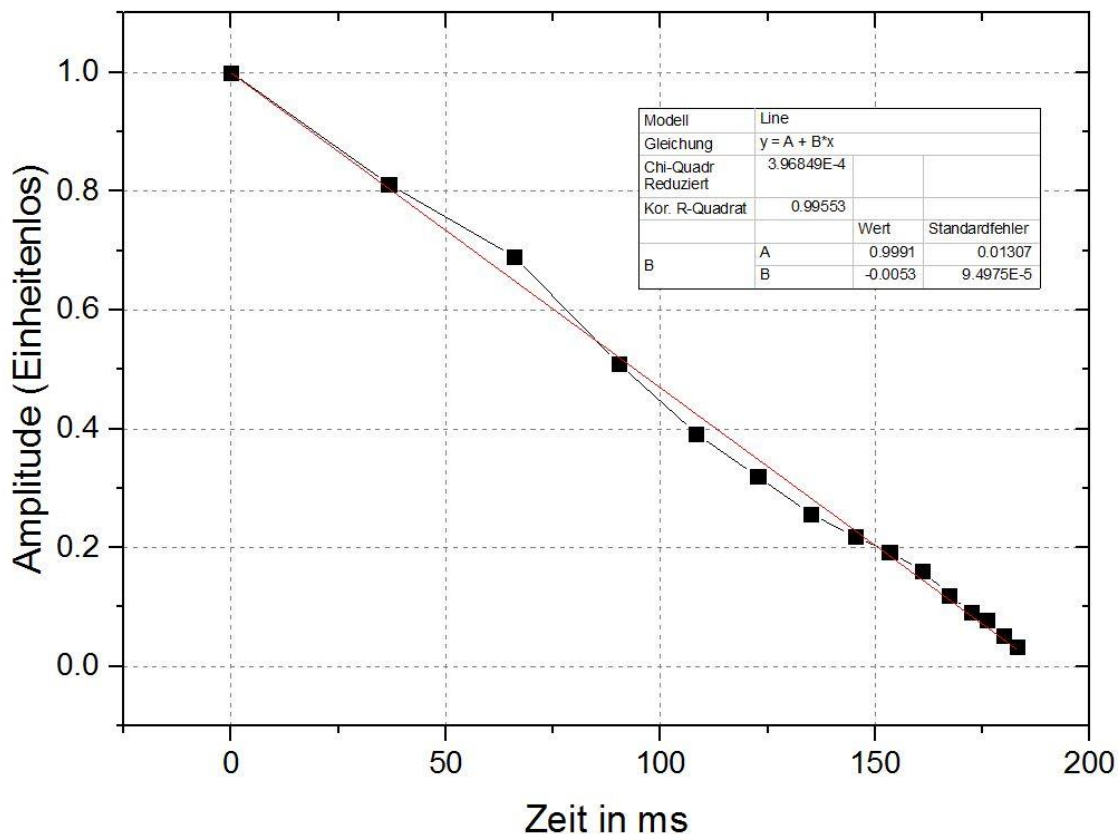
$$\Leftrightarrow y_n = y_0 \cdot \left(1 - \frac{t_n}{t_{max}}\right)^{\frac{\log a}{\log b}}$$

Die erste Zeile ist diese Gleichsetzung. In der nächsten Zeile multiplizieren wir mit  $\log a$ . Nach den Logarithmusgesetzen können wir diesen Faktor auch als Potenz schreiben. Dadurch kann man in der vierten Zeile dann den Logarithmus „herauskürzen“, indem wir eine beliebige Basis nehmen. Nun lösen wir nach  $y_n$  auf.

Wir erhalten die Auslenkungen in Abhängigkeit von der Gesamtamplitude, der Momentanzeit  $t_n$ , der Gesamtzeit  $t_{max}$  und den beiden Abnahmefaktoren  $a$  und  $b$ .

Hier sehen wir dann unsere Messung der Amplitude in Abhängigkeit der Zeit.

Der Graph der Amplitude über die Zeit deutet auf eine lineare Abnahme hin (Abb 6.1). Damit wäre  $y_n = y_0 \cdot (1 - \frac{t_n}{t_{max}})^1$  die zugehörige Gleichung.



6.1 Amplitude abhängig von der Zeit

Eine alternative Darstellung der Formel wäre  $y_n = y_0 \cdot (b^n)^{\frac{\log a}{\log b}}$  aufgrund folgender Umformung:  $t_n = t_{max} \cdot (1 - b^n) \Leftrightarrow \frac{t_n}{t_{max}} = 1 - b^n$ .

## Physikalische Betrachtung

### Das Basketballmodell

$$h_0(t) = -\frac{g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + 0$$

$$= t(v_0 - \frac{g}{2} \cdot t)$$

$$t_{0,1} = 0$$

$$t_{0,2} = \frac{2v_0}{g}$$

$$v_1 = \alpha \cdot v_0$$

$$\Rightarrow t_{1,2} = \frac{2 \cdot v_1}{g}$$

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m}{2} \cdot v^2 (\text{Amplitude})$$

$$h = \frac{v^2}{2 \cdot g} = \frac{(\alpha \cdot v_{n-1})^2}{2 \cdot g}$$

$$h_{n+1} = \alpha^2 \cdot h_n$$

Das Herunterfallen eines Basketballs lässt sich mit der Gleichung in der ersten Zeile beschreiben, die wir gleich 0 setzen, da wir den Abnahmefaktor für den Zeitabstand zwischen den einzelnen Peaks herausfinden wollen. Damit erhalten wir zum einen 0, was uns aber nicht weiter interessiert, und auch  $\frac{2 \cdot v_0}{g}$ . Da wir jetzt davon ausgehen, dass  $t$  mit einem Faktor  $\alpha$  abnimmt, muss folglich auch  $v$  mit einem Faktor  $\alpha$  abnehmen, da 2 und  $g$  konstant sind.

Die Energiebetrachtung liefert dann den Abnahmefaktor für die Auslenkung (hier  $h$ ). Wir formen nach  $h$  um und erkennen, dass die Auslenkung lediglich von  $v$  und  $g$  abhängt. Da  $g$  konstant ist und wir herausgefunden haben, dass  $v$  mit  $\alpha$  abnimmt, muss  $h$  mit  $\alpha^2$  abnehmen. Wie wirkt sich das im logarithmischen Term aus?

Wenn die Periode mit  $\alpha$  abnimmt, muss die Auslenkung mit  $\alpha^2$  abnehmen. Wir können davon ausgehen, dass die Periode mit einem gewissen Faktor abnimmt, da uns nur das logarithmische Verhältnis interessiert. Daraus folgt:  $\frac{\log \alpha^2}{\log \alpha} = 2$

Damit hätten wir beim Basketballmodell eine quadratische Abnahme der Amplitude über die Zeit.

### Verallgemeinerung

Neben dem Basketballmodell gibt es noch viele andere Modelle, z.B. das Federmodell bei dem die rücktreibende Kraft die Federkraft ist. Bei den berühmten ellipsoiden Magneten wäre es die Magnetkraft. Daraus schließen wir, dass sich sämtliche Modelle erst einmal nur in ihrer rücktreibenden Kraft unterscheiden, genauer gesagt in der Proportionalität zu einer bestimmten Potenz des Weges: Beim Basketballmodell ist die rücktreibende Kraft immer konstant, sodass die Kraft selbst zu  $s^0$  proportional ist. Bei der Federkraft ist sie jeweils proportional zur Auslenkung

(Hooke'sche Feder), also zu  $s^1$ , bei der Magnetkraft (in einem homogenen Magnetfeld) nimmt sie mit  $r^2$  -ab, das heißt mit  $s^{-2}$ .

Aus diesen Überlegungen gelangen wir zu der Annahme, dass sich die rücktreibende Kraft allgemein darstellen lässt als  $F = c \cdot s^a$ , wobei  $a$  die Potenz des Weges,  $s$  der Weg und  $c$  die jeweiligen Konstanten davor sind. Durch das allgemeine Gesetz, dass die Energie das Integral aus Kraft und Weg ist, erhalten wir für die Energie:

$$E = \frac{c}{a+1} \cdot s^{a+1}$$

Generell haben wir dann eine Schwingung zwischen dieser Energieform und der kinetischen Energie bei unseren Modellen.

Damit gilt:

$$\frac{m}{2} \cdot v^2 + \frac{c}{a+1} \cdot s^{a+1} = \text{konst.}$$

Durch Ableiten erhalten wir:

$$\frac{m \cdot 2v \cdot \dot{v}}{2} + c \cdot s^a \cdot \dot{s} = 0$$

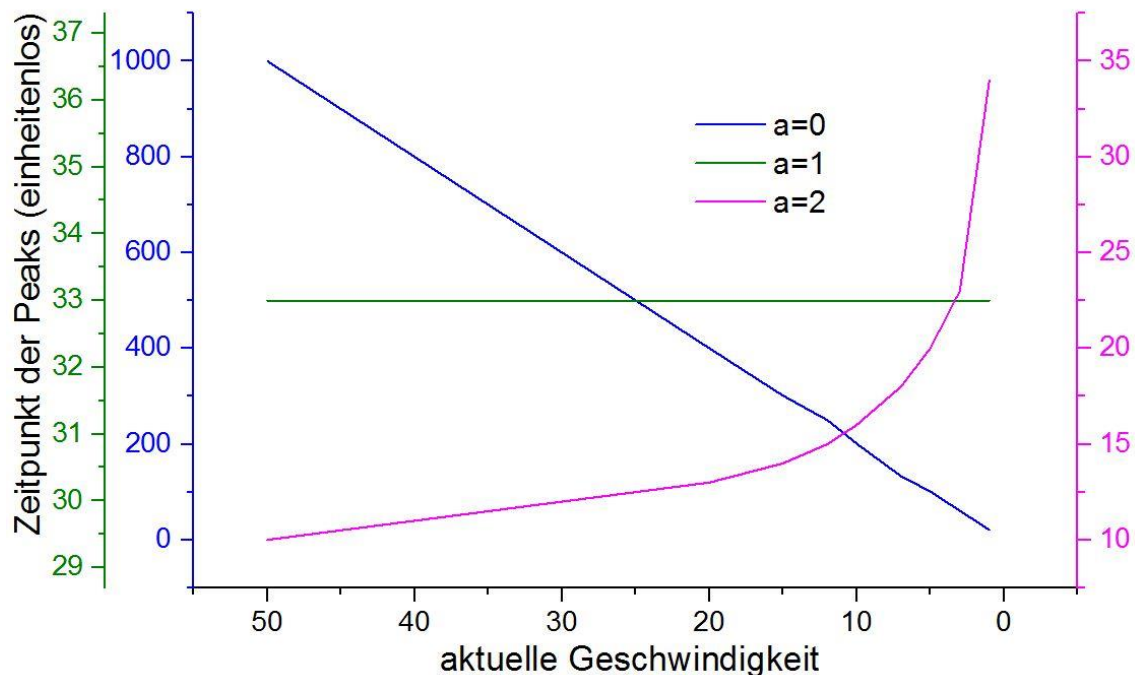
Durch  $v$  teilen ergibt:

$$m \cdot \ddot{s} + c \cdot s^a = 0$$

Diese nicht-lineare Differentialgleichung ist das Ergebnis der Energiebetrachtung. Grundsätzlich stimmt diese, wie wir im Folgenden sehen werden, mit unserem Basketballmodell überein.

Diese Differentialgleichung haben wir mit Hilfe einer numerischen Simulation ausgewertet. Die Energieabnahme simulieren wir mit Hilfe von  $v$  als variabler Größe, da die Energie kurz vor dem Aufprall beider Kugeln nur in  $\frac{m}{2}v^2$  vorliegt, sodass wir mit einer geringeren Geschwindigkeit auch gleichzeitig eine geringere Energie haben.

Da wir uns den Graphen plotten lassen, können wir anhand der Nullstellen die Schwingungsperiode und damit die Frequenz ablesen. Dabei erhalten wir folgende Ergebnisse für die Funktion des Weges bei unterschiedlichen Exponenten:



9.1 Zeitpunkte der Zusammenstöße (Peaks) abhängig von der Geschwindigkeit (wegen der numerischen Simulation einheitenlos)

Der Zeitpunkt der Peaks ergibt sich aus der ersten Nullstelle des Graphen mit der gegebenen Potenz und abhängig von der Geschwindigkeit. Also zeigen die Graphen die Nullstellen der numerischen Simulation abhängig von der Geschwindigkeit. Diese Graphen stimmen bei  $a=0$ , also dem Basketballmodell, überein, da wir eine umgedrehte Parabel als Funktion für die Strecke erhalten, sodass wir tatsächlich eine quadratische Abnahme erhalten.

Bei  $a=1$ , also unserem Federmodell, erhalten wir eine Sinusfunktion, sodass die Nullstellen unabhängig von der Größe der Energiezufuhr / -entnahme konstant bleiben.

Das läuft analog zu einem Federpendel ( $T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}}$ ), bei dem die Periode auch in der Theorie immer konstant ist. Bei dem Pendel lässt sich die in der Wirklichkeit nicht konstante Periode durch Luftverwirbelungen und andere Störungen erklären. Bei unserem Versuch sind Störungen z.B. die Reibung an den Schienen und die Tatsache, dass unsere Feder nur bei kleinen Auslenkungen eine Hooke'sche Feder ist.

a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
v	1	3	5	7	10	12	15	20	50	1	3	5	7	10	12	15	20	50
Periode	21	61	101	133	201	250	301	400	999	33	33	33	33	33	33	33	33	33

9.2 Messwerttabelle

Allgemein lässt sich aus den „Versuchswerten“ folgende allgemeine Regel schließen: T ist proportional zu  $v^{1-a}$ , damit wäre es bei  $a=1$ :  $v^0$ , also nicht abhängig von v, bei  $a=0$  einfach v, wie man auch in unserer Herleitung des Basketballmodells sieht.

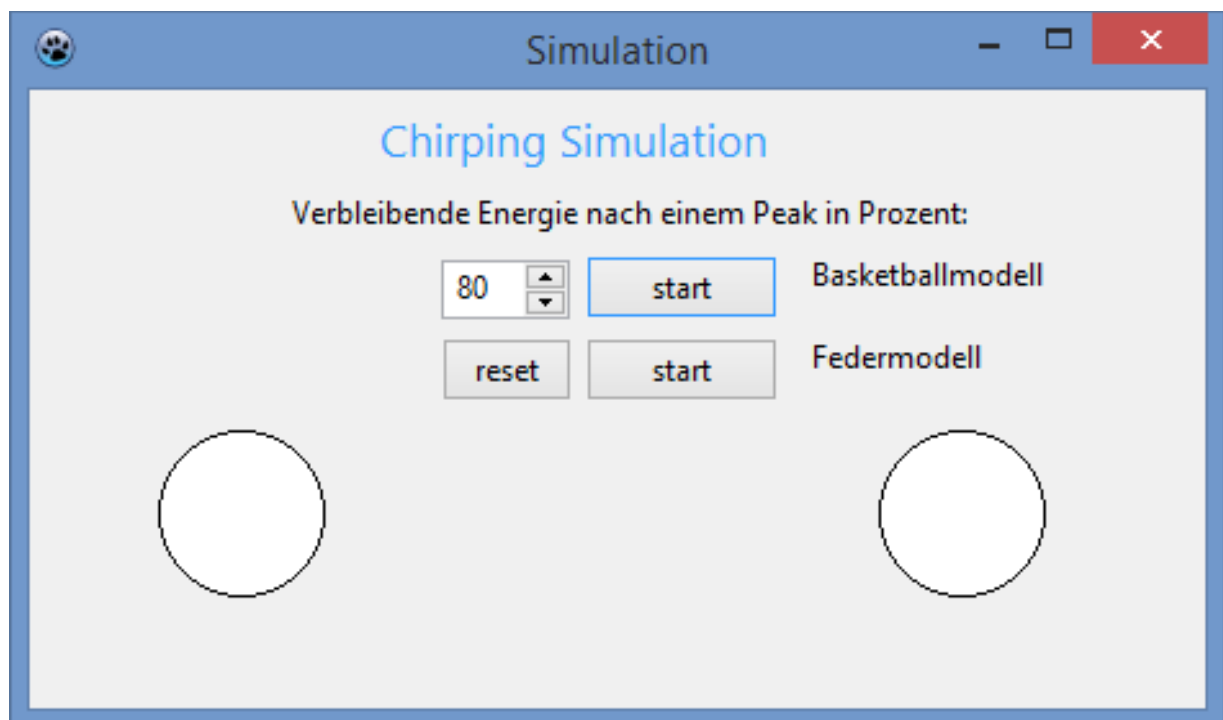
Wenden wir diese Regel auf negative Potenzen an, so wäre bei  $a=-2$ , also einem Magnetfeld  $T$  proportional zu  $v^3$ , die Periode würde also bei abnehmender Energie wesentlich stärker abnehmen als beim Basketballmodell.

Man mag sich jetzt fragen, wieso wir keine konstante Schwingungsperiode bei unseren Versuchsdaten haben, obwohl wir eine Hooke'sche Feder benutzen. Die Schwingungsperiode müsste an sich konstant bleiben, sie nimmt hingegen exponentiell ab. Dies liegt daran, dass die Federauslenkung nach dem ersten Aufprall so gering ausgelenkt ist, dass die rücktreibende Kraft als annähernd konstant angenommen werden kann, da sich die Auslenkungen kaum unterscheiden.

Damit entspricht unser Versuchsaufbau eher dem Basketballmodell.

### Die Simulation

Um sich dieses Phänomen besser vorstellen zu können, haben wir auf Basis unserer Messergebnisse und vor allem auf Basis unsere physikalischen Herleitungen eine Simulation eines Chirps programmiert. Die Simulation ist in Delphi geschrieben und implementiert unser Basketballmodell und unser Federmodell als Beispiele. Damit wir uns dabei nicht auf eine Kraft, die die Kugeln zusammendrückt, festlegen müssen, ist der prozentuale Energieerhalt nach einem Peak wählbar.



10.1 Selbst programmierte Simulation

Die Simulation basiert auf der Annahme, dass sich die Kugeln mit wachsender Geschwindigkeit aufeinander zu bewegen. Sobald sie sich berühren oder überschneiden, werden die Geschwindigkeiten mit  $-1$  multipliziert, sodass sie sich dann an diesem konkreten Zeitpunkt mit derselben Geschwindigkeit auseinander bewegen wie kurz davor aufeinander zu bewegen. Allerdings werden sie nun mit

derselben Kraft gebremst wie sie vorher beschleunigt wurden, sodass sie immer weniger Ausschlag bekommen. Diese Kraft lässt sich für verschiedene Szenarien verschieden einstellen.

### Ausblick

Um bewerten zu können, wie genau wir gearbeitet haben und an welchen Stellen unsere Schwächen liegen, haben wir vor unsere Forschungsergebnisse mit den Ergebnissen der anderen Gruppen des ursprünglichen Wettbewerbs, des IYPT's, zu vergleichen. Aus diesem Vergleich erhoffen wir uns Bestätigung aber auch Kritik an unseren Forschungsmethoden und Ergebnissen.

### Mögliche Fehlerquellen

Wir sind uns darüber im Klaren, dass eine solche Erforschung mit allerlei Fehlern verbunden sein kann. Einen Hauptgrund sehen wir darin, dass wir nicht im Labor, sondern in der Schule experimentiert haben. So hatten wir in der Schule keinen konstanten Luftdruck und damit eventuell unterschiedlich starke Spannung auf der Feder. Weiterhin konnten wir Störgeräusche aus den Aufnahmen nicht vollständig entfernen wodurch die Messungen verfälscht sein können. Zum Beispiel können wir das Geräusch, das die Kugeln auf den Schienen verursachen, nicht herausfiltern. Weiterhin konnten wir nicht berücksichtigen, dass sich die Kugeln bei verschiedenen Temperaturen ausdehnen bzw. zusammenziehen.

### Ergebnis

Nach unseren Versuchen und der darauf aufbauenden Theorie ist der entstehende Chirp ein Ton, der aus vielen verschiedenen Peaks entsteht, die in einem bestimmten Verhältnis zu einander stehen. Wenn man sich auf die ursprüngliche Fragestellung bezieht, könnte man unsere Finger als Feder interpretieren, die die Kugeln immer wieder zusammen stoßen lässt. Insgesamt kann man einen Chirp also als eine, durch den Energieverlust beim Zusammenstoßen, gedämpfte Schwingung beschreiben.



## Danksagung

Wir bedanken uns recht herzlich bei unseren Mitschülern, bei Prof. Dr. Jakob Schelten, bei Dr. Alexander Gottberg und vor allem bei unserem Betreuer Herrn Dr. Ebert für ihre Unterstützung und Motivation bei diesem Projekt.

## Quellenverzeichnis

Sämtliche Graphen und Formeln in diesem Dokument wurden ausschließlich von unserer Gruppe erstellt.

- Deckblattgrafik: 27.01.14 17:37 als Kombination von
  - [http://kleinteileversand.de/Produkte\\_Reinartz/Kugeln/Kugeln-Neu.jpg](http://kleinteileversand.de/Produkte_Reinartz/Kugeln/Kugeln-Neu.jpg) (27.01.14 17:33)
  - <http://weavesilk.com/> (selbstgemacht 27.01.14 17:31)
- Für Tonmessungen haben wir das PC-Programm Audacity verwendet. (30.01.14)
- Metzler Physik, J. Grehn, J. Krause, 4. Auflage, S.116 (gedämpfte Schwingung)
- <http://www.ld-lidactic.de/software/524221de/Content/ExperimentExamples/Physics/Mechanics/VelositySoundSolids.htm> (30.01.14 21:29)
- [http://www.christian-doppler.com/CD\\_FONDS/WELLEN.HTM](http://www.christian-doppler.com/CD_FONDS/WELLEN.HTM) (30.01.14 21:30)

## Auswertung des Wettbewerbs (Jugend Forscht)



Der Jugend Forscht Wettbewerb 2014 begann für uns mit dem Regional Wettbewerb Berlin Süd am 24. bis 25. Februar 2014. Dort stellten wir unsere erste Version des Versuchs vor bei der wir noch einen komplizierten Aufbau mit Gummis benutzten, der in ungenauen Messwerte resultierte.

Schon bei dem Jury Gespräch am 24.02. hatten wir ein gutes Gefühl, vor allem weil ein Juror (Herr Dr. Alexander Gottberg) angeboten hat, dass wir uns nochmal im Nachhinein mit ihm über unser Projekt unterhalten. Am Nachmittag haben wir dann ausführlich über das Projekt gesprochen und einige Verbesserungsmöglichkeiten erörtert; vor allem auf die physikalische Ausarbeitung bezogen. Er hat uns auch auf die Idee gebracht, uns nicht auf verschiedene Modelle zu beziehen, wie wir es bis zu dem Zeitpunkt gemacht hatten, sondern zu versuchen, das Phänomen durch die rücktreibende Kraft zu beschreiben, wie wir es jetzt tun. Weiterhin haben wir die Darstellung unsere Versuchsergebnisse in den Graphen und deren Approximationen deutlich verbessert, indem wir ein anderes Programm verwenden.

Am 25.02. war die Siegerehrung, in der wir zusammen mit Charlotte Kappler von unserer Schule den ersten Preis bekamen und als zwei Gruppen in den Landeswettbewerb durften. Außerdem hat unsere Schule den Jugend Forscht Preis erhalten, weil mehrere Gruppen aus unserer Schule erfolgreich am Regionalwettbewerb teilgenommen haben und es in verschiedenen Fachbereichen in den Landeswettbewerb geschafft haben.

Die Landesrunde Berlin fand dann am 25. und 26. März in Berlin Mitte, in den Gebäuden von Siemens statt. Dort war unsere Konkurrenz durch die Selektierung in den Regionalwettbewerben Berlin Mitte und Berlin Nord sehr viel stärker geworden als sie es noch im Regionalwettbewerb war. Mit unserem nun deutlich verbesserten Aufbau und der verbesserten physikalischen Betrachtung hatten wir bei dem Jury Gespräch trotzdem ein gutes Gefühl.

Am 26. März stellte sich bei der Siegerehrung enttäuschender Weise heraus, dass wir es nicht geschafft hatten in den Bundeswettbewerb weiter zu kommen. Bei dem folgenden Jurygespräch hatten wir leider den Eindruck, dass die Jury unsere Arbeit noch nicht einmal sehr ausführlich gelesen hatte und dementsprechend unseren Erläuterungen bei der Vorstellung und auch bei dem folgenden Gespräch nicht vollständig folgen konnte.

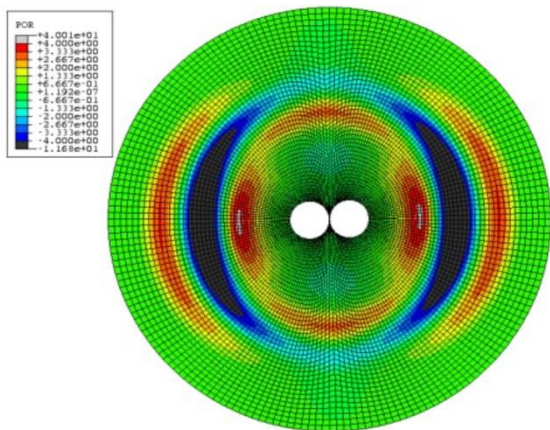
## Vergleich mit den Ergebnissen vom IYPT

Im Folgenden möchten wir unsere Ergebnisse mit denen des slowakischen Nationalteams des IYPT 2014 vergleichen. Auf der Archivseite des IYPT's wurden zwei Präsentationen freigegeben und die Slowaken waren das bessere Team, weshalb wir uns auf deren Arbeit beziehen. Die Arbeit stammt von Jakub Chudík.

Als erstes ist da das Thema der Frequenz des Tones. Eine Idee ist, dass sich stehende Wellen in der Kugel selbst oder auf ihrer Oberfläche bilden und diese dann den Ton erzeugen. Hierzu folgt eine genauere Nachbearbeitung von unserer Seite, auch wenn Chudík dieselbe Idee hatte und sie auch wegen der zu hohen Frequenz verworfen hat.

Der Ansatz der Slowaken bezüglich der Entstehung des Chirps ist ähnlich wie bei uns, wobei sein Aufbau zeigt, dass er sich nur mit dem „Basketballmodell“ beschäftigt hat. Bei seinem Aufbau fallen die beiden Kugeln in einer Röhre aufeinander, wobei diese innen mit Schaumstoff ausgekleidet ist, sodass die Kugeln dabei nicht an den Rand stoßen. Die Auswertung seiner Graphen und auch die dazugehörige Theorie der linearen Abnahme entspricht unserer Theorie für das Basketballmodell, also der Fall  $a=0$ .

Eine weitere interessante Beobachtung, welche wir dann bei späteren Versuchen, nachdem wir seine Arbeit gelesen haben, verifizieren können, ist, dass sich der Ton hinter den Kugeln lauter ausbreitet als neben den Kugeln.



15.1 2D Darstellung der Tonausbreitung

Rot und grau sind hierbei die Maxima und blau und schwarz stellen Minima da. Allerdings konnten wir, wie Chudík auch, keinen allzu großen Unterschied feststellen. Bei unseren Messungen beträgt die Differenz zwischen den Lautstärken weniger als 10 Prozent, was auch der Grund ist, weswegen uns das nicht aufgefallen ist und wir das nicht weiter beachten werden.

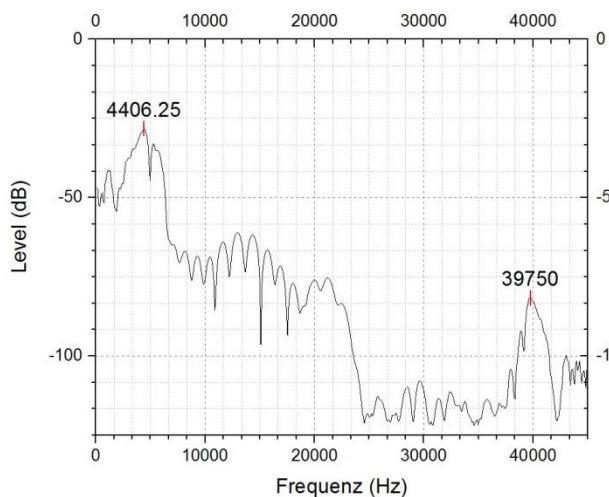
## Frequenz des Tones

Unsere Jugend Forscht Arbeit befasst sich wie oben schon erwähnt gar nicht mit der Frequenz des Chirps, weshalb wir uns nochmal verstärkt darauf fokussiert haben, diese zu ermitteln. Die Eigenfrequenz der Kugeln kann es nicht sein, da diese sich wie folgt berechnet:

$$f_{\text{Metallkugel}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{5170 \text{ m/s}}{8 \cdot 0.017 \text{ m}} \approx 38 \text{ kHz}$$

Dabei ist  $c$  die Schallgeschwindigkeit in Stahl und  $\lambda$  die Wellenlänge. Diese Frequenz ist weit außerhalb des hörbaren Frequenzbereichs, weshalb wir aufgehört hatten die Ursache der Frequenz zu bestimmen.

Nach weiteren Forschungen sind wir auf eine Arbeit von K. Mehraby, H. Khademhosseini Beheshti und M. Poursina mit dem Thema „Impact noise radiated by collision of two spheres: Comparison between numerical simulations, experiments and analytical results“ (auf Deutsch: „Geräuschentwicklung beim Aufeinandertreffen zweier Sphären: Vergleich von numerischen Simulationen, Experimenten und analytischen Ergebnissen“) gestoßen. In dieser wird der Ursprung der Frequenz sehr ausführlich erarbeitet und als ein Ergebnis entsteht folgende Formel für die Frequenz:



$$f = \frac{76.1}{r} \text{ Hz}$$

Das bedeutet- bei unseren Kugeln mit einem Radius von  $r = 0,017\text{m}$  auf eine Frequenz von ungefähr  $4.476 \text{ Hz}$ . Gemessen haben wir im Durchschnitt eine Frequenz von ungefähr  $4.406 \text{ Hz}$ . Somit sieht man, dass diese Theorie auch gut zu unseren Messwerten passt.

## Selbstevaluation

Folgt später

## Beantworten der Problemfrage

Unser Titel stellt die Frage, wie ein Chirp entsteht:

Ein Chirp entsteht durch das wiederholte Aufeinanderschlagen der beiden Kugeln, welches durch die rücktreibende Kraft geschieht. Das bedeutet, es entsteht ein einziger Peak wenn die Kugeln aufeinanderschlagen, aber erst durch die rücktreibende Kraft entstehen mehrere Peaks, bei denen das System mit den beiden Kugeln und der rücktreibenden Kraft an Energie verliert. Im Idealfall geht diese Energie nur in den hörbaren Ton über, realistisch hingegen geht die Energie bei unserem Versuchsaufbau aber hauptsächlich in Reibung an zum Beispiel der Schienen verloren. Durch den Energieverlust und das wiederholte Aufeinandertreffen der Kugeln entsteht das charakteristische „zirpende“ Geräusch.

Die Frequenz des hörbaren Tons liegt bei unseren Kugeln ungefähr bei  $4406 \text{ Hz}$ , während die Eigenfrequenz der Kugeln bei ca.  $38 \text{ kHz}$  liegt, weshalb es nicht die Schwingung der Kugeln ist, die wir hören. Die Frequenz, die wir hören, sind Wellen, die beim Aufprall zwischen den Kugeln entstehen. Mit dem Radius unserer Kugeln

kommen wir auf eine errechnete Frequenz von ungefähr  $4.476\text{Hz}$ , was sehr nah an unserer gemessenen Frequenz liegt.

### Quellenverzeichnis

Sämtliche Graphen und Formeln in diesem Dokument wurden ausschließlich von unserer Gruppe erstellt.

- Deckblattgrafik: 27.01.14 17:37 als Kombination von
  - [http://kleinteileversand.de/Produkte\\_Reinartz/Kugeln/Kugeln-Neu.jpg](http://kleinteileversand.de/Produkte_Reinartz/Kugeln/Kugeln-Neu.jpg) (27.01.14 17:33)
  - <http://weavesilk.com/> (selbstgemacht 27.01.14 17:31)
- 1.1 Ellipsoiden: <http://ecx.images-amazon.com/images/I/31rwfDrP2QL.jpg> (03.12.2014 13:44)
- IYPT-Vortrag:  
[http://solutions.iypt.org/uploads/2014\\_SK\\_Ball\\_sound\\_Michal\\_Hled%C3%ADk\\_Martin\\_Murin\\_Jakub\\_Chud%C3%ADk\\_1406284981.pdf](http://solutions.iypt.org/uploads/2014_SK_Ball_sound_Michal_Hled%C3%ADk_Martin_Murin_Jakub_Chud%C3%ADk_1406284981.pdf) (03.12.2014 14:34)
- 15.1 3D Darstellung der Tonausbreitung:  
[http://www.researchgate.net/profile/Mehrdad\\_Poursina/publication/225820012\\_Impact\\_noise\\_radiated\\_by\\_collision\\_of\\_two\\_spheres\\_Comparison\\_between\\_numerical\\_simulations\\_experiments\\_and\\_analytical\\_results/links/00463527e9e985bfd2000000](http://www.researchgate.net/profile/Mehrdad_Poursina/publication/225820012_Impact_noise_radiated_by_collision_of_two_spheres_Comparison_between_numerical_simulations_experiments_and_analytical_results/links/00463527e9e985bfd2000000) (04.12.2014 17:36)
- Frequenzberechnung:  
[http://www.researchgate.net/profile/Mehrdad\\_Poursina/publication/225820012\\_Impact\\_noise\\_radiated\\_by\\_collision\\_of\\_two\\_spheres\\_Comparison\\_between\\_numerical\\_simulations\\_experiments\\_and\\_analytical\\_results/links/00463527e9e985bfd2000000](http://www.researchgate.net/profile/Mehrdad_Poursina/publication/225820012_Impact_noise_radiated_by_collision_of_two_spheres_Comparison_between_numerical_simulations_experiments_and_analytical_results/links/00463527e9e985bfd2000000) (04.12.2014 21:32)