

Martin-Andersen-Nexö-Gymnasium Dresden

Dokumentation zur Projektarbeit

Thema: Theoretische Analyse der Eigenschaften der Neutrinoarten ($\nu_e; \nu_\mu; \nu_\tau$).

Experimentelle Untersuchung der Neutrinomischung mit Hilfe eines zu optimierenden Pendelmodells.

Vorgelegt von: Johannes Pausch

Externer Betreuer: Professor Dr. Michael Kobel
Institut für Kern- und Teilchenphysik
Technische Universität Dresden

Dresden, den 22. Juni 2007

Kurzfassung

Die Neutrinos sind seit ihrer Vorhersage im Jahre 1930 ein Rätsel in der Wissenschaft. Die gegenwärtigen Forschungsbereiche der Teilchenphysik suchen immer wieder nach neuen Möglichkeiten, sie zu verstehen.

Eine der rätselhaften Eigenschaften der Neutrinos ist ihre Oszillation. Tau-, Myon- und Elektron-Neutrinos wandeln sich periodisch ineinander um. Jedes Neutrino ist „zusammengesetzt“ aus drei Massenzuständen. Diese Massenzustände oszillieren in unterschiedlichen Frequenzen. Ihre Überlagerung bestimmt, welche Art von Neutrino gerade vorliegt.

Herr Professor Dr. Michael Kobel entwickelte für diese Oszillation eine Modellvorstellung. Danach kann man die Massenzustände mit Hilfe von drei gekoppelten Pendeln veranschaulichen. Die Schwebung dieser Pendel sollte dabei anzeigen, welches Neutrino mit welcher Wahrscheinlichkeit, zu welcher Zeit und wie häufig vorkommt.

In der vorliegenden Arbeit werden in einem theoretischen Teil zunächst die Neutrinos im „Teilchenzoo“ ausfindig gemacht, ihre Entstehung und Oszillation beleuchtet.

Um zu überprüfen, ob die Neutrino-Oszillation durch das Modell der gekoppelten Pendel dargestellt werden kann, müssen verschiedene Experimente durchgeführt werden.

In diesem praktischen Teil der Arbeit stehen Untersuchungen mechanischer Schwingungen und Schwebungen im Vordergrund.

Ziel der Projektarbeit ist es, die von Herrn Professor Kobel vorgeschlagenen Experimente als Beitrag zum Verständnis der Theorie der Neutrinos auszuführen. Im Ergebnis der Arbeit sollen folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Oszillations-Eigenschaften werden durch das Modell korrekt dargestellt?
- Wo gibt es keine Übereinstimmung zwischen Modell und Wirklichkeit?

Die Vorbereitungen für die abschließenden Experimente laufen noch zu diesem Zeitpunkt und sind Gegenstand dieses Berichtes.

Das Pendelmodell für die Erklärung der Neutrino-Oszillation soll später in der Fakultät Physik zu Lehrzwecken verwendet werden.

Abstract

Since their prediction in 1930 neutrinos have been a mystery of science. The current fields of research in particle physics are searching for new ways to understand them.

One of their mysterious features is their oscillation. Tau, myon and electron neutrinos convert periodically into each other. Each Neutrino “consists” of three states of mass. Those masses oscillate with different frequencies. Their superposition defines which neutrino flavor is currently present.

Professor Dr. Michael Kobel developed a model concept for the oscillation. With this model, one can demonstrate the states of mass as three linked pendulums. The beats of the pendulums are supposed to show which neutrino flavor is present at what chance and time. The theoretical part of this paper introduces the neutrino particle, its position in between in the other elementary particles and its origin and oscillation is examined.

To check whether the model describes the neutrino oscillation correctly, experiments have to be done.

In this practical part the main focus is drawn to oscillations and beats.

The project’s object is to carry out the experiments suggested by Professor Kobel as part of the understanding of the neutrino theory. As a result of the work the following questions will be answered:

- Which oscillation features are correctly shown by the model?
- Where are faults of the model with regard to reality?

The preparations for the final experiments are being done at this moment and form the content of this report.

It is planned to use the pendulum model for educational purposes to visually explain the neutrino oscillation at the university.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Abriss der Geschichte der Elementarteilchenphysik.....	7
3	Neutrinos.....	9
3.1	Entstehung.....	9
3.1.1	Sterne und natürliche Zerfälle.....	9
3.1.2	Teilchenschauer in der Atmosphäre.....	10
3.1.3	Künstliche Neutrinoquellen.....	10
3.2	Erforschung der Neutrinos.....	11
3.2.1	Homestake.....	11
3.2.2	Super-Kamiokande.....	12
3.3	Neutrino-Oszillation und Pendel: die Hypothese.....	12
4	Gekoppelte Pendel.....	14
4.1	Einführung.....	14
4.2	Federschwinger und eigene Messungen.....	15
4.3	Homogene Schwingung bei gekoppelten Pendeln?.....	18
4.4	Die Kopplungslänge der Pendel.....	21
5	Ausblick.....	23
6	Literatur- und Quellenverzeichnis.....	24
6.1	Buch.....	24
6.2	Internet.....	24
6.3	Gespräche.....	25
7	Verzeichnis von Tabellen und Abbildungen.....	26
7.1	Tabellen.....	26
7.2	Abbildungen.....	26

Formeln, Abkürzungen, Indizes

Formelzeichen	Einheit	Begriff	Formelzeichen	Begriff
E_{kin}	eV	kinetische Energie	d	Down-Quark
F	N	Kraft	e^-	Elektron
F_f	N/m	Federkraft	e^+	Positron
F_g	N/m	Gewichtskraft	E	Energie
F_r	N/m	Rücktreibende Kraft	μ	Myon
g	m/s ²	Fallbeschleunigung	$\bar{\mu}$	Anti-Myon
k	N/m	Federkonstante	n	Neutron
l	m	Länge; Höhe	ν_e	Elektron-Neutrino
m	eV/c ² ; kg	Masse	$\bar{\nu}_e$	Antielektron-Neutrino
n		Anzahl	ν_μ	Myon-Neutrino
T	s	Periode	$\bar{\nu}_\mu$	Antimyon-Neutrino
t	s	Zeit	ν_τ	Tau-Neutrino
ω	Hz	Schwebungsfrequenz	$\bar{\nu}_\tau$	Antitau-Neutrino
x; x_1 ; x_0 ; y	m	Auslenkung	p	Proton
			π^+	Positives Pion
			π^-	Negatives (anti) Pion
			u	Up-Quark
			X; Y	Atomkern

1 Einleitung

Die Erforschung der Neutrinos gehört zu den aktuellsten Forschungsbereichen der Teilchenphysik. Die Eigenschaften der Neutrinos sind seit ihrer Vorhersage im Jahr 1930 immer noch ein Rätsel und es wird immer wieder nach neuen Möglichkeiten gesucht, sie zu verstehen. Dabei gibt es viele Theorien über die Bedeutung des „kleinen Neutralen“. Zum Beispiel gab es die Vermutung, dass sie die dunkle Materie erklären könnten, doch diese These wurde wieder verworfen.

Eine der rätselhaften Eigenschaften der Neutrinos ist ihre Oszillation. Tau-, Myon- und Elektron-Neutrinos wandeln sich periodisch ineinander um. Jedes Neutrino ist „zusammengesetzt“ aus drei Massenzuständen. Diese Massenzustände oszillieren in unterschiedlichen Frequenzen. Ihre Überlagerung bestimmt, welche Art von Neutrino vorliegt. Dabei kann man nur schwer Aussagen über einzelne Neutrinos treffen. Vielmehr ist es möglich, die Wahrscheinlichkeit, welches der drei Neutrino-Arten an einem bestimmten Ort oder zu einer bestimmten Zeit in welcher Häufigkeit auftritt, zu beschreiben.

Herr Professor Dr. Michael Kobel entwickelte für diese Oszillation eine Modellvorstellung. Nach diesem Modell kann man die Schwebung der drei Massenzustände mit Hilfe von drei gekoppelten Pendeln veranschaulichen. Die Schwebung der drei Pendel sollte dabei anzeigen, welches Neutrino mit welcher Wahrscheinlichkeit zu welcher Zeit wie häufig vorkommt. Um zu überprüfen, ob die gekoppelten Pendel die Neutrino-Oszillation modellartig darstellen, müssen umfangreiche Experimente durchgeführt werden.

Das Ziel dieser Projektarbeit ist es, diese Experimente als Beitrag zur Überprüfung des Modells der Neutrinos auszuführen. Es ist geplant, die Projektarbeit als BeLL weiterzuführen, um am Ende zu einem abschließenden Urteil kommen zu können. Im Ergebnis der Arbeit sollen die Fragen geklärt werden: Welche Oszillations-Eigenschaft wird durch das Modell korrekt dargestellt? Wo gibt es keine Übereinstimmung zwischen Modell und Wirklichkeit? Die Vorbereitungen für die abschließenden Experimente laufen noch zu diesem Zeitpunkt und sind Gegenstand dieses Berichtes.

2 Abriss der Geschichte der Elementarteilchenphysik

Seit Jahrtausenden beschäftigt die Erklärung von Vorgängen und Phänomenen, sowie der Welt selbst, das Denken und Streben der Menschheit. Philosophen stellten Theorien auf, deren Begründung unserer heutigen Vorstellung von Wissenschaft stark widerspricht. Erst mit Aristoteles begann der Wandel zur empirischen Forschung [11].

Bereits hundert Jahre vor ihm war durch Anaxagoras, Leukipp und seinem Schüler Demokrit die Vorstellung von Atomen als kleinste Teilchen entstanden. Diese sollten sich im leeren Raum befinden und ihre Umordnung Werden und Vergehen erklären. Weiterhin sollten diese Atome sich immer in Bewegung befinden. Die Theorie über Atome wurde jedoch bis in das 16. Jahrhundert von der Kirche als heidnisch deklariert [B1][12][13][14][15].

Erst der Chemiker Antoine Lavoisier veröffentlichte 1789 eine Theorie, in der er sich von den vier Elementen des Mittelalters - Feuer, Wasser, Luft und Erde - abwandte und 23 neue Elemente einführte. 1860 wurde das Atom offizieller Bestandteil der chemischen Lehre [15].

Auch Physiker beobachteten neue Phänomene und entwickelten neue Theorien. 1871 stellte Wilhelm Weber das erste Atommodell mit Elektronen auf. Cromwell Fleetwood Varley wies deren negative Ladung nach. Joseph John Thomson stellte, beruhend auf seinen Experimenten mit Kathodenstrahlen, eine Theorie auf, nach welcher Elektronen sich gegenseitig abstoßen und ihre Masse sehr viel kleiner sei als die eines Wasserstoff-Ions [15][16].

Zu Beginn des 20. Jh. führte Max Planck die Quantisierung elektromagnetischer Strahlung ein und fünf Jahre später prägte Albert Einstein den Begriff des Photons als ein solches Quant [17].

Ernest Rutherford schuf 1911 ein Atommodell, bei dem er zwischen Atomkern und -hülle unterschied und deren Ausmaße kalkulierte. Außerdem bewies er, dass 99,9% der Masse eines Atoms in seinem Kern sich befindet, und dass die elektrostatische Kraft zwischen Elektronen und Atomkern wirkt. Sein Schüler Niels Bohr erweiterte dieses Modell 1913 und beschrieb Elektronen, die im Atom sich auf Bahnen befinden und die beim Wechsel von einer höheren in eine niedrigere Bahn Energie emittieren. Die Existenz von Protonen wurde schließlich von Rutherford 1919 nachgewiesen [16][17][18].

In den folgenden Jahrzehnten überschlugen sich die Ereignisse in der Physik.

Der Begriff der „starken Kraft“ wurde eingeführt, das quantenartige Verhalten der Röntgenstrahlen wurde entdeckt und die Welleneigenschaft von Teilchen erkannt. Niels Bohr, Max Born, Paul Dirac, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli und Erwin Schrödinger entwickelten bis zum Ende der zwanziger Jahre die Quantenmechanik. Der Begriff des „Bosons“ wurde geprägt. Bosonen sollten „Vermittler“-Teilchen für eine neuartige schwache Kraft zwischen Elementarteilchen sein. 1930 postulierte Pauli ein „Neutron“, welches später von Enrico Fermi in Neutrino umbenannt wurde. Doch zuvor beschrieb Dirac noch ein weiteres „neues“ Teilchen, das Positron, welches das Antiteilchen des Elektrons sein sollte. 1932 entdeckte James Chadwick schließlich das Teilchen, das uns heute als Neutron bekannt ist. Im Jahr darauf führte Fermi die Begriffe „Flavour-Änderung der Neutrinos“ und „schwache Wechselwirkung“, deren Vermittlerteilchen verschiedene Arten von Bosonen sein sollten, ein. 1937 wurde ein Teilchen entdeckt, welches zuerst für ein π -Meson (Erklärung siehe Ende Abschnitt und 3.1.2) gehalten, aber nach dem Krieg als Myon erkannt wurde. Dieses Elementarteilchen war dem Elektron sehr ähnlich, doch besaß es eine höhere Masse. Deswegen führte man eine so genannte zweite Generation von Elementarteilchen ein. Das wahre π -Meson wurde kurz darauf ebenfalls entdeckt. Mit Hilfe der von Donald Blaser entwickelten Blaskammer konnte man ab 1952 viele neue Teilchen aufspüren. Die Streuexperimente der nachfolgenden Jahre gaben Hinweise auf eine innere Struktur von Protonen und Neutronen [17][19].

Für die Entwicklung und Bestätigung der Neutrino-Theorie war das Jahr 1953 von großer Bedeutung. Es gelang Fred Reines und Clyde Cowen mit ihrer Apparatur „Poltergeist“ erstmals Neutrinos nachzuweisen [B2][110].

1962 gelang es experimentell zu zeigen, dass es verschiedene Arten von Neutrinos gibt, das Myon-Neutrino und das Elektron-Neutrino [17].

Martin Lewis Perl entdeckte 1975 das Tauon (auch Tau oder Tau-Lepton). Es war dem Myon und dem Elektron so ähnlich und unterschied sich wieder nur in seiner Masse von den anderen beiden Teilchen, dass das Tauon in eine dritte Generation von Elementarteilchen eingegliedert wurde. 2000 wurde erstmals am Fermilab das dazu gehörige Tau-Neutrino gesichtet.

Inzwischen hatte man auch drei Generationen von Quarks gefunden, welche die vermutete innere Struktur von Protonen und Neutronen erklärten. Diese Materieteilchen bilden in verschiedenen Kombinationen Mesonen, welche aus zwei Quarks bestehen, und Baryonen, welche aus drei Quarks bestehen, wie z. B. das Proton und das Neutron.

Außerdem hatte man zwei Jahrzehnte zuvor in Hamburg, am Deutschen Elektronen-Synchrotron (DESY), eine Gruppe von Wechselwirkungsteilchen nachgewiesen, die für die starke Kraft zuständig sein sollten, die Gluonen. Die starke Kraft erklärt den Zusammenhalt von mehreren Quarks. Weiterhin wird vermutet, dass es auch ein Wechselwirkungsteilchen für die Gravitation geben könnte. Dieses „Graviton“ wurde jedoch bisher noch nicht experimentell bestätigt.

Die Wechselwirkungsteilchen und die Materieteilchen bilden das heutige Standardmodell der Elementarteilchen (Tabelle 1).

[B3][111][112][116]

Tabelle 1: Standardmodell der Elementarteilchen

Materieteilchen/Fermionen			
Generation	I	II	III
Leptonen	Elektron e^-	Myon μ	Tau τ
	Elektron-Neutrino ν_e	Myon-Neutrino ν_μ	Tau-Neutrino ν_τ
Quarks	Down	Strange	Bottom
	Up	Charm	Top

Wechselwirkungsteilchen/Bosonen			
	Gluon	Photon	$W^{+/-}$ - und Z-Boson
Träger der	Starken Kraft	Elektromagnetischen Kraft	Schwachen Kraft

Quelle: nach [B5][B6]

Alle Materieteilchen haben noch ein Antiteilchen. Bei den Neutrinos wird vermutet, dass sie ihre eigenen Antiteilchen sein könnten. Antiteilchen haben die gleichen Massen wie ihre Partner, aber ihre elektromagnetischen, schwachen und starken Ladungen sind entgegengesetzt. Bisher sind die Massen aller dieser Teilchen außer der des Neutrinos bekannt. Es wird vermutet, dass die Massen der Neutrinos sehr gering sind. So schloss man aus der Explosion der Supernova SN 1987A in der großen Magellanschen Wolke und der nicht gemessenen Verspätung der Neutrinos gegenüber dem Licht, dass ihre Massen nicht größer als $20 \text{ eV}/c^2$ sein müssten. Inzwischen schätzt man, dass die Masse des Elektron-Neutrinos, welche eigentlich aus drei interferierenden Massenzuständen besteht, kleiner $3 \text{ eV}/c^2$ ist (Näheres siehe 3.3) [B2][B3][112][G1][G2].

Die Erforschung und der Neutrinos ist bei Weitem noch nicht abgeschlossen. Es gibt immer wieder neue Theorien, die durch Experimente bestätigt werden müssen und neue Modelle, die helfen sollen die Phänomene der Natur zu verstehen.

3 Neutrinos

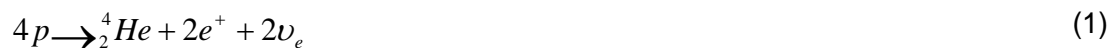
3.1 Entstehung

Neutrinos haben natürliche und künstliche Quellen. Heute sind drei natürliche Quellen bekannt: Kernreaktionen in Sternen, Teilchenschauer in der Atmosphäre und natürliche Zerfallsprozesse radioaktiver Materialien, wie u. a. ^{40}K . Zu den künstlichen Quellen zählen Kernreaktoren, Nuklearbomben, Teilchenbeschleuniger und medizinische Verfahren, wie z. B. die Positronenemissionstomographie (PET).

3.1.1 Sterne und natürliche Zerfälle

Quelle: [G1]

Im Inneren eines Sternes findet die Kernfusion statt. Dabei wandeln sich Protonen teilweise in Neutronen um und verbinden sich zu Atomen mit höheren Ordnungszahlen. Elektron-Neutrinos entstehen dabei als „Nebenprodukt“ dieser Prozesse.



Vereinfacht dargestellt passiert Folgendes:



Diese Kernreaktion wird auch β^+ -Zerfall genannt. Da diese Reaktion im Kern der Sonne, bei ca. 10^7 K, mit großen Mengen an Materie stattfindet, entstehen auch sehr viele Neutrinos. Von der Sonne werden ungefähr 100^{10} Elektron-Neutrinos pro Sekunde und Quadratzentimeter ausgesandt. Davon erreichen ca. 10^{10} Elektron-Neutrinos auf der gleichen Fläche, im gleichen Zeitintervall die Erde. Da Neutrinos eine sehr niedrige Masse besitzen, aber eine vergleichsweise hohe kinetische Energie von ungefähr 0,5 bis 8 MeV haben, könnte man ca. 400 Neutrinos zugleich in einem Kubikzentimeter finden.

Der Umkehrprozess von Gleichung (2) ist auch als β^- -Zerfall bekannt. Hier zerfällt ein Neutron in einer Halbwertszeit von durchschnittlich 15 min in ein Proton, ein Elektron und ein Antielektron-Neutrino:



Neutronen und Protonen gehören zu den Baryonen und bestehen aus Quarks. Das Neutron besteht aus einem up- und zwei down-Quarks, das Proton aus zwei up- und einem down-Quark. D.h., dass ein down-Quark in ein up-Quark, ein Elektron und ein Antielektron-Neutrino zerfällt:



3.1.2 Teilchenschauer in der Atmosphäre

Quelle: [G1]

Die Leitfähigkeit von staubfreier Luft war bis 1901 ungeklärt. Doch in diesem Jahr äußerte C.T.R. Wilson die Vermutung, dass es eine außerplanetarische, hochenergetische Strahlung geben könnte, die zu der Ionisierung von Luft führe. Experimente auf dem Eiffelturm und mit Ballons schienen diese Theorie zu bekräftigen. Schließlich wies V.F. Hess 1912 die kosmische Herkunft dieser Strahlung mit Hilfe präziser Ionisationskammern in einem Ballon nach. Die Entdeckung dieser Strahlung aus dem Kosmos stellte sich als wahre Goldmine für noch unbekannte Teilchen heraus [B4].

Kosmische Strahlung ist eine Teilchenstrahlung aus dem Weltall. Vorwiegend kommen in der Strahlung Protonen, Elektronen, Neutrinos von Sternen und ionisierte Atome vor. Wenn die Protonen mit hoher kinetischer Energie auf die Teilchen der Atmosphäre der Erde treffen, kommt es zu Wechselwirkungen, es entsteht ein Teilchenschauer mit vielen Sekundärteilchen. Als solche Sekundärteilchen treten unter anderen Pionen auf, die zu den Mesonen gehören, d.h., sie bestehen aus zwei Quarks. Das π^- weist ein Anti-up-Quark und ein down-Quark auf, das π^+ ein Anti-down-Quark und ein up-Quark.

In diesem Prozess zerfallen die Pionen wiederum auf Grund der schwachen Wechselwirkung in andere Teilchen, den Myonen und Neutrinos. Diese Prozesse können durch die Feynman-Diagramme vereinfacht dargestellt werden [B5].

$$\pi^- : \begin{array}{c} d \\ \bar{u} \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{c} d \\ \bar{u} \end{array}} \right\} \cdots \cdots \cdots \begin{array}{c} w^- \\ \bar{\nu}_\mu \end{array} \quad (6)$$

$$\pi^+ : \begin{array}{c} \bar{d} \\ u \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{c} \bar{d} \\ u \end{array}} \right\} \cdots \cdots \cdots \begin{array}{c} w^+ \\ \nu_\mu \end{array} \quad (7)$$

Myonen zerfallen ebenfalls innerhalb von ca. 2 μs in Elektronen, bzw. Positronen, und Myon- und Elektron-Neutrinos:

$$\bar{\mu} \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e \quad (8)$$

$$\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu + e^+ + \nu_e \quad (9)$$

Wenn man nun den Teilchenschauer in der Atmosphäre als Gesamtheit betrachtet, stellt man fest, dass in der Atmosphäre doppelt so viele Myon-Neutrinos bzw. ihre Antiteilchen entstehen als Elektron-Neutrinos. Hinzu kommen aus der kosmischen Strahlung die Elektron-Neutrinos aus der Sonne.

3.1.3 Künstliche Neutrinoquellen

Zu den künstlichen Quellen für Neutrinos zählen medizinische Verfahren, Teilchenbeschleuniger, Kernreaktoren und Nuklearbomben.

Die Phänomene in Kernreaktoren und Nuklearbomben beruhen auf dem Prozess der so genannten Kettenreaktion. Dabei treten unter anderem Beta-Zerfälle der Reaktionsprodukte (Spaltfragmente) auf, bei denen auch Neutrinos entstehen.

Eine kleine Besonderheit stellt in diesem Zusammenhang die Positronenemissionstomographie dar. Hier werden auch, wie bei der Nuklearmedizin üblich, radioaktive Substanzen verwendet. Doch bei diesem Tomographen werden Radionuklide benutzt, die beim Zerfall Positronen abgeben. Das heißt, es findet hier ein β^+ -Zerfall statt:



Eine weitere künstliche Quelle sind Teilchenbeschleuniger. Hier wird der Effekt des Teilchenschauers genutzt, um die Wechselwirkungen zwischen Teilchen genauer erforschen zu können. Man beschleunigt Teilchen mit Hilfe elektrischer und magnetischer Felder und lässt sie auf einander prallen, sodass es zu Wechselwirkungen kommt. Der Teilchenschauer kann anschließend mit Fotoplatten und Detektoren analysiert werden.

3.2 Erforschung der Neutrinos

Bei dem Versuch der Erforschung der Neutrinos, stieß man auf das Problem, dass sie nur äußerst selten in Wechselwirkung mit anderen Teilchen treten. Trotzdem gelang es einige Messmethoden zu entwickeln. Zwei außergewöhnliche Messmethoden sollen hier im Folgenden beschrieben werden.

3.2.1 Homestake

Quelle: [I13][I14][G3]

Anfang der 1960er Jahre wurde das Homestake-Experiment in einer Goldmine in South Dakota, USA gestartet. Dabei wurde ein Tank mit Tetrachlorethen 1500 m unter der Erdoberfläche platziert. Der Grund für die Auswahl dieses Ortes war, dass der Tank durch die Erdmassen von den meisten anderen kosmischen Teilchen, die bei den Messungen Störungen hervorrufen könnten, abgeschirmt wurde.

Das Prinzip des Experimentes war, dass Chloratome mit Elektron-Neutrinos wechselwirken und Chlor sich in Argon unter Abgabe von Elektronen verwandelt. Dabei kann nur das stabile Chlor-37 diese Reaktion eingehen. Es kommt zu 24,23 % in der Natur vor:



Das entstehende Elektron kann von dem Argon-Ion nicht wieder eingefangen werden, da es zu schnell ist. Das Argon-37 ist jedoch nicht stabil und hat eine Halbwertszeit von ca. 35 Tagen. Bei Einfang eines anderen Elektrons zerfällt es wieder. Ein Proton und ein Elektron verwandeln sich in ein Neutron und Elektron-Neutrino. Der Kernrückstoß löst ein weiteres Elektron aus der Hülle und es entsteht ein Chlor-37-Ion, ein Elektron und ein Elektron-Neutrino:



In dem Tank waren 615 t Tetrachlorethen. Daraus ließ sich errechnen, dass ca. 2 Argon-Teilchen pro Tag entstehen würden. Unter Berücksichtigung der Zerfallsrate des Argons ließ sich die Anzahl der vorhandenen Argon-Teilchen nach einer bestimmten Zeit kalkulieren. Nach 60 bis 70 Tagen wurden die Argon-Teilchen aus dem Tank durch komplizierte chemische Verfahren herausgefiltert und ihre Anzahl abgeschätzt. Das Ergebnis des Experiments war

zu dieser Zeit jedoch noch verwirrend. Man fand nur ungefähr ein Drittel der erwarteten Argon-Teilchen. Diese niedrigere Rate ließ sich später mit der Neutrino-Oszillation erklären.

3.2.2 Super-Kamiokande

Quelle: [B2][115]

Kamiokande steht für „Kamioka Nucleon Decay Experiment“ und ist eine Forschungseinrichtung in der Nähe der japanischen Gemeinde Kamioka (heute Hida). Im Jahr 1983 ging die Anlage in Betrieb. Sie war ursprünglich gebaut worden, um den Zerfall von Protonen nachzuweisen. Dieser wurde jedoch nie beobachtet. Später wurde Kamiokande weiter ausgebaut und heißt heute Super-Kamiokande.

Das Kernstück dieses Experimentes ist ein zylindrischer Wasserbehälter mit 50.000 t ultrareinem Wasser. Er liegt in 1.000 m Tiefe, in einem Zink- und Bleibergwerk, um ihn vor anderer Strahlung zu schützen. Der Tank ist umgeben von 12.000 Photomultiplier-Röhren. Wenn nun ein Neutrino in dem Tank mit einem Kern Y wechselwirkt, entsteht ein anderer Kern X und der elektromagnetisch geladene Partner des Neutrinos. Bei diesem Partner handelt es sich entweder um ein Elektron, ein Myon oder ein Tauon.



Bei der Wechselwirkung erhält der Partner eine hohe kinetische Energie. Da er eine geringe Masse hat, ist seine Geschwindigkeit sehr hoch, er breitet sich schneller als das Licht im Wasser aus.

Wenn nun ein Elektron, Myon oder Tauon im Wasser eine höhere Geschwindigkeit als Licht hat, führt das zu dem so genannten Tscherenkow-Effekt. Wenn Teilchen in ein Medium eintreten, dann kommt es zur Polarisierung der umliegenden Atome. Durch die Polarisierung werden elektromagnetische Strahlen ausgesandt. Wenn das Teilchen, das diesen Effekt hervorrief, langsamer als das Licht in dem Medium ist, dann sind die elektromagnetischen Wellen destruktiv. Wenn aber das Teilchen schneller als das Licht im Medium ist, dann werden die elektromagnetischen Wellen schneller erzeugt, als sie sich auslöschen können. Ihre Frequenz liegt im sichtbaren Bereich, das heißt, man kann Tscherenkow-Licht sehen. Im Tank von Super-Kamiokande wird dieses Licht jedoch mit den 12.000 Photomultiplier-Röhren gemessen und ausgewertet.

Mit Super-Kamiokande ist damit ein großer Fortschritt gelungen, denn es können die einzelnen Neutrino-Arten unterschieden und ihre Bewegungsrichtung bestimmt werden.

3.3 Neutrino-Oszillation und Pendel: die Hypothese

Quelle: [G1]

Das Wort Neutrino stammt aus dem Italienischen und bedeutet so viel wie kleines Neutrales. Neutrinos haben keine elektromagnetische Ladung. Sie besitzen jedoch eine schwache Ladung, die bei allen „Neutrino-Arten“ gleich ist. Die verschiedenen „Arten“ nennt man auch Flavours. Sie unterscheiden sich durch die Flavourquantenzahl, die man messen kann. Diese sagt aus, dass bei Wechselwirkung mit einem Kern ein Elektron-Neutrino ein Elektron erzeugt, ein Myon-Neutrino ein Myon und ein Tau-Neutrino ein Tauon:



Die Flavours haben keine definierten Massen und keine definierte Lebensdauer. Ein reiner Flavourzustand ist eine quantenmechanische Überlagerung dreier Massenzustände. Diese Massenzustände kann man sich als Schwingungen mit jeweils unterschiedlichen Frequenzen vorstellen. Die Überlagerung der Massenzustände wäre demnach eine Schwebung dieser Schwingungen.

Eine formal vergleichbare Schwebung kommt auch bei drei gekoppelten Pendeln zustande. Ihre Schwebung ist eine Überlagerung dreier Eigenmoden, welche ein Pendant zu den Massenzuständen der Neutrinos darstellen. Die Amplituden der einzelnen Pendel lassen sich mit der Wahrscheinlichkeit der Flavourzugehörigkeit in Relation setzen. Die Massendifferenzen der Neutrinos sind den Stärken der Federn ähnlich. Drei gekoppelte Pendel stellen ein Modell für die Neutrino-Oszillation dar. Diese Hypothesen gilt es zu untersuchen.

4 Gekoppelte Pendel

4.1 Einführung

Eine mechanische Schwingung ist eine zeitlich periodische Bewegung eines Körpers um seine Gewichtslage. Bei einer homogenen Schwingung ist der Betrag der Kraft, die der Auslenkung entgegen gerichtet ist, proportional zur Auslenkung. Eine homogene Schwingung hat die mathematische Form einer Sinus- oder Kosinus-Funktion. Auf die Mechanik übertragen, ist die Auslenkung eines Pendels gleichzusetzen mit der Ordinate der Funktion, wobei auf der Abszisse der Zeitpunkt der Messung aufgetragen ist.

In der Realität gibt es jedoch aufgrund vieler Faktoren keine wirklich homogene Schwingung. Durch Reibung wird die Schwingung verfälscht und gedämpft. Bei Fadenpendeln betrachtet man fälschlicherweise den Abstand des Pendels von der Ruheposition als Auslenkung und nicht das Bogenmaß. Bei Federschwingern ist die Kraft nur in einem bestimmten Bereich der Dehnung proportional zur Auslenkung.

Die Auslenkung mechanischer Pendel ist näherungsweise vergleichbar mit einer homogenen Schwingung und wird bei Betrachtungen im weiteren Text meist gleichgesetzt.

Das von Professor Kobel entwickelte gekoppelte Pendel besteht aus drei massiven Metallscheiben, die die gleiche Masse besitzen. Sie sind jeweils an einer massiven Stange befestigt und führen ungekoppelt vergleichbare Bewegungen wie ein Fadenpendel aus, d.h. man kann sie getrennt von einander wie separate Pendel betrachten. Eine Gestängekonstruktion verbindet die Kugellageraufhängungen der drei einzelnen Pendel. Die Kopplung eines Pendels zu den anderen erfolgt über an so genannten Reitern befestigten Zugfedern. Die Reiter der Federn sind für jedes Pendel einzeln höhenverstellbar.

Abbildung 1 zeigt das Pendel skizzenhaft mit den wichtigsten Maßen in mm:

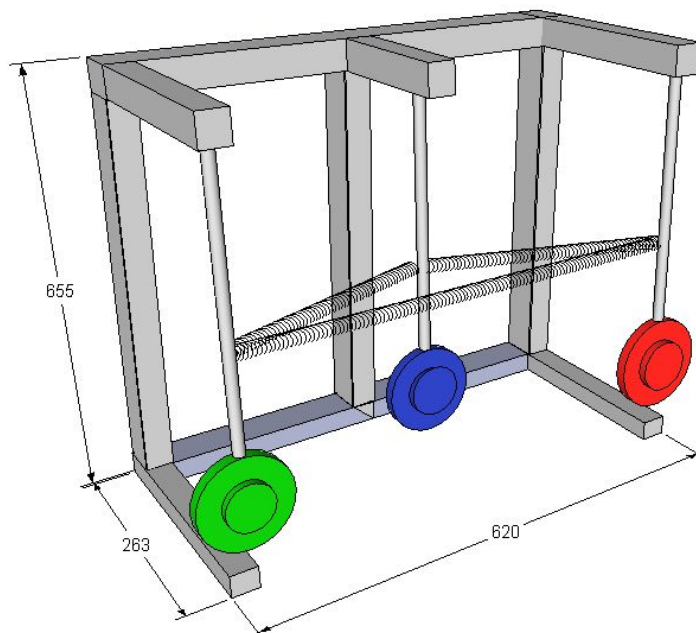


Abbildung 1: Skizze der gekoppelten Pendel

Bei der Kopplung von Pendeln kommt es zu komplizierten Bewegungsvorgängen. Zwei gekoppelte Pendel sind vergleichbar mit zwei sich überlagernden Schallwellen, die eine leicht unterschiedliche Frequenz haben, diese entsprechen den Eigenmoden der Pendel. Eigenmoden sind Schwebungen zweier Schwinger (hier Pendel), bei denen sich die

Amplitude nicht ändert. Bei zwei gekoppelten Pendeln gibt es den gleichsinnigen Eigenmodus, bei dem die Pendel synchron schwingen und die Federn keine Arbeit leisten, und den gegensinnigen Modus. Hier schwingen die Pendel in entgegengesetzter Richtung, die Feder wird beansprucht.

Bei drei gekoppelten Pendeln gibt es auch die beiden beschriebenen Eigenmoden der zwei gekoppelten Pendel. Beim gleichsinnigen Modus schwingen alle drei Pendel synchron, beim gegensinnigen Modus bewegt sich das Pendel in der Mitte nicht. Drei Pendel weisen aber noch einen dritten Eigenmodus auf, bei dem die äußeren Pendel synchron schwingen, das mittlere Pendel schwingt gegensinnig zu den anderen beiden. Abbildung 2 verdeutlicht diesen Modus:

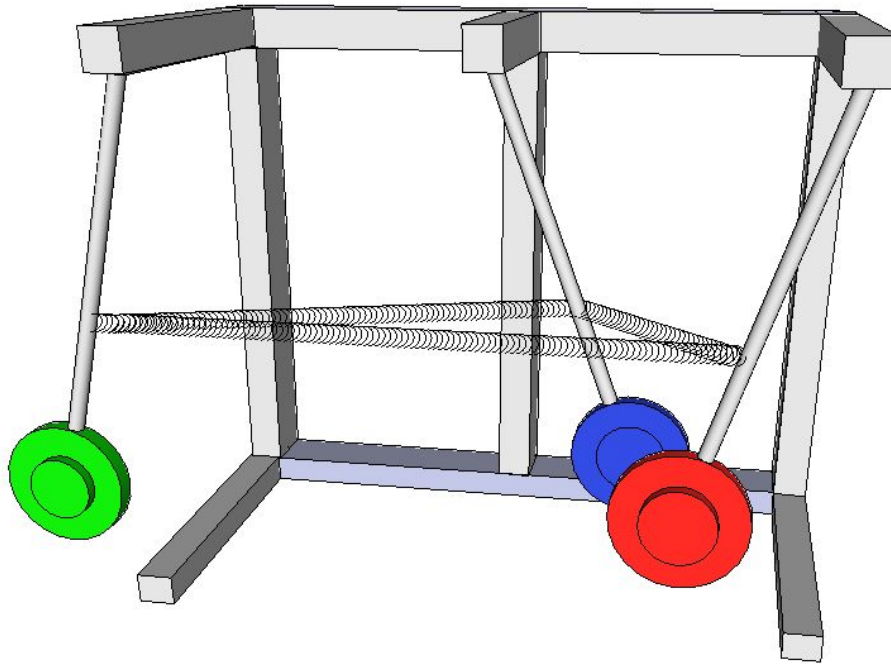


Abbildung 2: Dritter Eigenmodus der Pendel

Voraussetzung dafür, dass diese Eigenmoden auch für drei gekoppelte Pendel zutreffen ist, dass die hinteren kürzeren Federn gleiche Federkonstanten aufweisen. Sonst würde z. B. bei dem gegensinnigen Eigenmodus das mittlere Pendel ebenfalls anfangen zu schwingen und damit seine Amplitude verändern. Das heißt, die Schwebung dreier Pendel ist abhängig von den Federkonstanten der Kopplungsfedern. Da in der Literatur praktisch keine Bewegungsgleichung für drei gekoppelte Pendel zu finden ist, müssen Experimente gemacht werden, um die Abhängigkeiten der Schwebung zu erfassen.

4.2 Federschwinger und eigene Messungen

Die klassische Feder ist ein spiralförmig gewickelter Draht oder in ähnlicher Form hergestellte Kunststoffe. Man unterscheidet zwischen Zug- und Druckfedern. Bei Zugfedern geht man davon aus, dass die einzelnen Windungen des Drahtes aufeinander liegen. Bei Druckfedern dagegen muss zwischen den Windungen für den Federvorgang Freiraum sein. Als Ausgangssituation lagen mehrere Zugfedern unterschiedlicher Stärke und Länge für die Kopplung der Pendel vor. Diese waren als Probefedern gedacht, um das weitere Vorgehen besser planen zu können. Um die Abhängigkeit der Schwebung von den Federkonstanten zu klären, mussten erst einmal die Federkonstanten der Federn ermittelt werden, die zur Verfügung standen. Dies war ein Gegenstand dieser Arbeit.

Für die Bestimmung von Federkonstanten gibt es zwei häufig verwendete Methoden: die dynamische und die statische. Beide wurden selbstständig durchgeführt. Die statische Methode beruht auf der Messung der Auslenkung x unter einer bestimmten Kraftwirkung. Dabei wird die Feder mit der Federkonstante k vertikal aufgehängt und ein Massestück wird an dem frei hängenden unteren Ende befestigt. Das Massestück befindet sich in der Gleichgewichtslage. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die Gewichtskraft F_g des Massestückes der Masse m betragsmäßig gleich groß ist wie die Federkraft F_f , die in entgegengesetzter Richtung wirkt. Die Differenz aus der Länge ohne Belastung und mit Belastung ist die Auslenkung x . Sie ist proportional zur wirkenden Federkraft F_f ; es gilt:

$$F_f = -kx \Leftrightarrow -\frac{F_f}{x} = k \quad (1)$$

Die wirkende Kraft lässt sich aus der Masse und der Fallbeschleunigung g berechnen:

$$F_g = gm \quad (2)$$

Die Federkonstante lässt sich demnach wie folgt ermitteln:

$$k = -\frac{mg}{x} \quad (3)$$

Für die Messungen wurden verschiedene Massestücke benutzt, um genauere Ergebnisse zu erzielen. Die Messungen wurden insgesamt mit vier Federn durchgeführt, die mit Farben zur Unterscheidung markiert waren. Die Messergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt, rot markiert sind die Messwerte, die sehr weit von den Erwartungen entfernt sind:

Tabelle 2: Messwerte der statischen Federkonstantenbestimmung 12.01.07

Feder	Messung	m in kg	x in m	k in N/m	\bar{k} in N/m
Rote Feder	1	0,1	0,1	9,81	9,81
	2	0,05	0,095	5,16	
	3	0,02	0,02	9,81	
Blaue Feder	1	0,01	0,57	0,17	0,16
	2	0,005	0,31	0,16	
	3	0,001	0,06	0,16	
Rotschwarze Feder	1	0,05	0,205	2,39	2,82
	2	0,02	0,07	2,80	
	3	0,01	0,03	3,27	
Blauschwarze Feder	1	0,02	0,165	1,19	1,30
	2	0,01	0,075	1,31	
	3	0,005	0,035	1,40	

Die meisten Messergebnisse liegen relativ nah bei einander, was für einen geringen zufälligen Fehler spricht. Trotzdem sind mögliche Messfehler darin zusehen, dass die Längendifferenzen s mit dem Auge an einem angelegten Lineal abgelesen wurden. Der rot markierte Wert stellt möglicherweise einen Fehler bei der Aufzeichnung der Daten dar und wird deshalb nicht gewertet.

Die dynamische Methode beruht darauf, dass ein Massestück an einem Ende der Feder hängt und anschließend einmalig ausgelenkt wird. Das Massestück schwingt dabei um seine Gleichgewichtslage. Das Phänomen ist wie folgt zu erklären. Es gilt immer noch das lineare

Kraftgesetz von Gleichung 1. Das Massestück ist nicht in seiner Gleichgewichtslage, es wirkt eine rücktreibende Kraft in Richtung der Gleichgewichtslage. Durch die Kraftwirkung wird das Massestück beschleunigt. Aufgrund der Trägheit bewegt es sich aber über die Gleichgewichtslage hinaus. Nun wirkt eine rücktreibende Kraft in entgegen gesetzter Richtung. Sie bremst das Massestück der Masse m bis zum Umkehrpunkt ab und beschleunigt es wieder in die andere Richtung, zurück zur Gleichgewichtslage. Der Vorgang beginnt von neuem.

Dabei gilt für die Winkelgeschwindigkeit ω folgende Gleichung, wobei k die Federkonstante der Feder darstellt:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (4)$$

Die Winkelgeschwindigkeit ω steht im Zusammenhang mit der Periodendauer T einer Schwingung:

$$\frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}} \Leftrightarrow k = \frac{4\pi^2 m}{T^2} \quad (5)$$

Die Periodendauer T lässt sich messen, indem man die Periodenanzahl n in einer bestimmten Zeit t misst bzw. zählt:

$$T = \frac{t}{n} \quad (6)$$

Die Messungen wurden wieder mit den vier Federn des statischen Experiments durchgeführt. Für jede Feder wurden 4 Messungen mit zwei verschiedenen Massestücken und verschiedenen Periodenanzahlen gemacht. Die Messergebnisse sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Messwerte der dynamischen Federkonstantenbestimmung 19.01.07

Feder	Messung	m in kg	n	t in s	T in s	k in N/m	\bar{k} in N/m
Rote Feder	1	0,1	100	63,1	0,631	9,92	10,08
	2	0,1	200	127,5	0,637	9,71	
	3	0,05	200	87,5	0,437	10,33	
	4	0,05	400	174,6	0,436	10,36	
Blaue Feder	1	0,005	200	264,6	1,323	0,113	0,10
	2	0,005	100	132,3	1,322	0,113	
	3	0,002	200	203,1	1,016	0,077	
	4	0,002	100	100,5	1,005	0,095	
Rotschwarze Feder	1	0,02	200	127,7	0,638	1,94	1,93
	2	0,02	120	76,8	0,640	1,93	
	3	0,01	200	90,7	0,454	1,92	
	4	0,01	100	45,1	0,451	1,94	
Blauschwarze Feder	1	0,01	200	121,8	0,609	1,07	1,00
	2	0,01	100	61,1	0,611	1,06	
	3	0,005	200	91,5	0,458	0,94	
	4	0,005	100	46,0	0,460	0,93	

Auffallend ist, dass für die jeweils geringen Gewichte, die Federkonstanten niedriger gemessen wurden. Eine mögliche Erklärung dafür wäre, dass Federschwinger keine wirklich homogene Schwingung in allen Bereichen der Dehnung ausführen. Bei besonders hohen Belastungen und bei besonders großer Auslenkung steigt die Kraftwirkung überproportional und damit auch die Federkonstante (Abbildung 3).

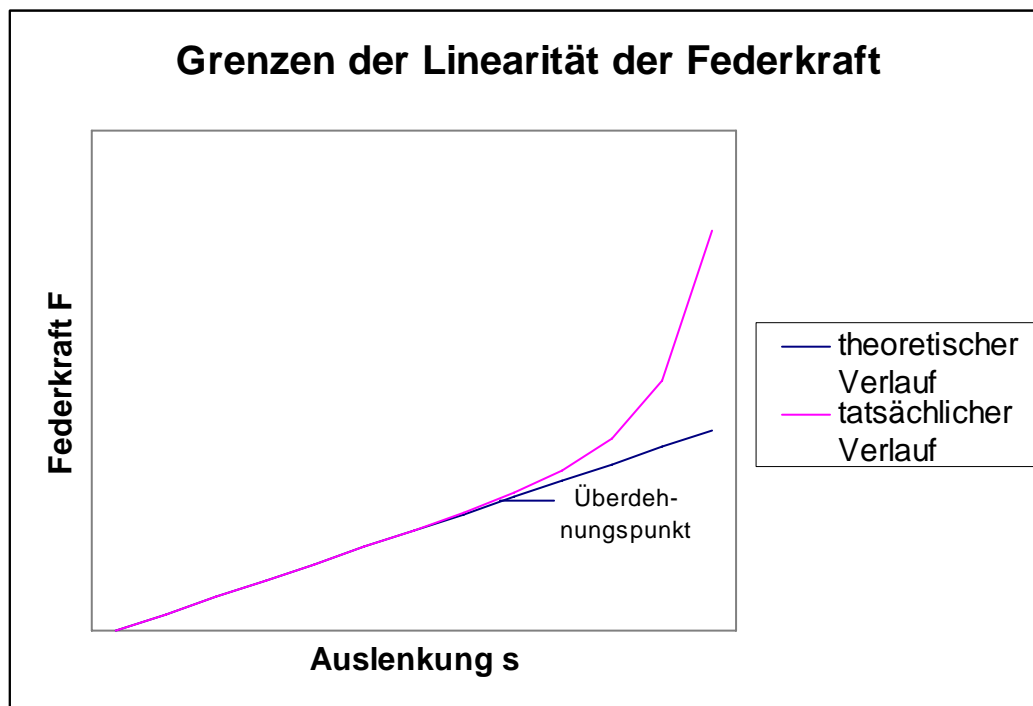


Abbildung 3: Grenzen der Linearität der Federkraft

Die Federkonstante ist der Anstieg der abgebildeten Kurve. Ab dem Überdehnungspunkt steigt die Federkonstante. Die Massestücke, die eine höhere Masse hatten, liegen eventuell hinter dem Überdehnungspunkt und führen so zu einer höheren Federkonstante als diejenigen mit einer niedrigeren Masse.

Ein systematischer Fehler bei der dynamischen Messung war, dass die Masse der Feder nicht in die Berechnung mit einbezogen wurde, denn es stand zu diesem Zeitpunkt keine passende Waage zur Verfügung.

Wenn man nun die beiden Methoden vergleicht, stellt man Folgendes fest: die größten Abweichungen bei der statischen Methode lagen bei $\pm 0,44$ N/m, ohne Berücksichtigung des rot markierten Wertes. Bei der dynamischen Methode lag dagegen die größte Abweichung bei $\pm 0,325$ N/m. Hier gab es jedoch keinen extrem ausfallenden Wert. Die dynamische Methode ist der statischen vorzuziehen, denn sie kann durch beliebige Verlängerung der Messzeit wesentlich genauere und zuverlässigere Ergebnisse liefern und ist von der Handhabung her auch praktikabler.

4.3 Homogene Schwingung bei gekoppelten Pendeln?

Quelle: [G4]

Im Anfangsstadium der Betrachtungen gekoppelter Pendel wurde bemerkt, dass die Pendel durch die Federkopplung ihre Ruheposition in einer Schräglage hatten. Der Grund war, dass die Federn nicht genauso lang waren wie der Abstand der Pendel von einander. Deshalb wurde die Frage gestellt, ob es sich überhaupt noch um eine homogene Schwingung in erster Annäherung handelt.

Folgende mathematisch-physikalischen Überlegungen sollen diese Frage untersuchen:

Betrachtet werden zwei Pendel, die durch eine Feder gekoppelt sind. Die Feder zieht beide Pendel leicht aus ihrer alten, ohne Feder eingenommenen Ruhelage. Berechnet wird die effektive rücktreibende Kraft im Fall der gegensinnigen Eigenschwingung. Wenn diese proportional zur Auslenkung bezüglich der neuen, mit Feder eingenommenen Ruhelage ist, dann kann man von einer homogenen Schwingung ausgehen.

Bei der gegensinnigen Eigenschwingung bleibt die Mitte der Feder aus Symmetriegründen in Ruhe. Wir können der Einfachheit halber annehmen, dass die Feder an dieser Stelle fest mit einer imaginären Wand verbunden ist, und müssen nur ein einziges Pendel betrachten. Dieser Fall ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Betrachtung der ersten Näherung bedeutet, dass der Sinus eines Winkels Phi (φ) gleich dem Winkel selbst ist. Allgemein gilt in der Physik, dass diese Behauptung bis zu einem Winkel von 5° relativ genau zutrifft.

$$\sin \varphi \approx \varphi \text{ für } \varphi \leq 5^\circ \quad (7)$$

Praktisch heißt das, dass die Amplitude dem Bogenmaß gleichgesetzt wird, und dass die rücktreibende Kraft der Federkraft in ihrer Richtung genau entgegengesetzt ist. Abbildung 4 verdeutlicht, dass die Federkraft F_f in Realität jedoch nicht genau der rücktreibenden Kraft F_r entgegengesetzt ist. Weiterhin sind in der Abbildung die Pendellänge l , die beliebige Auslenkung x , die Gewichtskraft F_g und der Auslenkungswinkel Phi dargestellt.

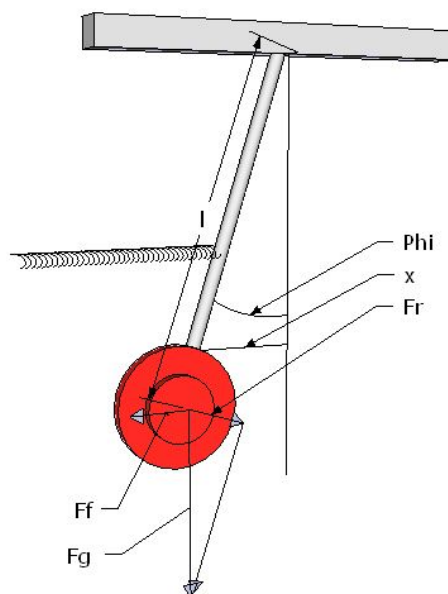


Abbildung 4: Kräfte am schrägen Pendel

Als erstes soll nun die Ruhelage bestimmt werden. Dazu wird die Vereinbarung getroffen, dass x_0 die Auslenkung beschreibt, bei der die Feder nicht beansprucht wäre, x_1 dagegen soll die Ruhelage des Pendels sein und x ist allgemein eine beliebige Auslenkung.

In der Ruhelage ergeben Feder- und rücktreibende Kraft addiert Null.

$$0 = \vec{F}_r + \vec{F}_f \quad (8)$$

Unter der Voraussetzung, dass die erste Näherung gilt, kann man die rücktreibende Kraft als Anteil der Gewichtskraft des Pendels berechnen.

$$F_r \approx F_g \cdot \sin \varphi = F_g \frac{x}{l} \quad (8)$$

Außerdem kann man die Federkraft in Abhängigkeit der Federauslenkung und der Federkonstante darstellen:

$$0 = k(x - x_0) + \frac{mg}{l}x \quad (9)$$

Damit ergibt sich für die Ruhelage des Pendels:

$$x_1 = \frac{kx_0}{k + \frac{mg}{l}} \quad (10)$$

Um allgemein jede beliebige Auslenkung x zu betrachten wird eine Substitution vorgenommen:

$$y = x - x_1 \Leftrightarrow x = y + x_1 \quad (11)$$

y stellt nun ebenfalls eine beliebige Auslenkung dar, jedoch mit dem Bezugspunkt der Ruhelage x_1 .

Wenn y ungleich Null ist hat Gleichung 7 nicht mehr das Ergebnis Null, es resultiert eine wirkende Kraft F :

$$\vec{F} = \vec{F}_r + \vec{F}_f \quad (12)$$

Die beliebige Auslenkung x wird diesmal durch $x=y+x_1$ ersetzt,

$$\vec{F} = k(y + x_1 - x_0) + \frac{mg}{l}(y + x_1) \quad (13)$$

und umgestellt:

$$\vec{F} = \left(k + \frac{mg}{l}\right)(y + x_1) - kx_0 \quad (14)$$

$$\vec{F} = \left(k + \frac{mg}{l}\right)y + \left(k + \frac{mg}{l}\right)x_1 - kx_0 \quad (15)$$

Die Pendelruhelage x_1 wurde vorher bestimmt und kann nun eingesetzt werden:

$$\vec{F} = \left(k + \frac{mg}{l}\right)y + \left(k + \frac{mg}{l}\right) \left(\frac{kx_0}{k + \frac{mg}{l}} \right) - kx_0 \quad (16)$$

Durch Kürzen und Subtraktion ergibt sich die finale Gleichung:

$$\vec{F} = y \left(k + \frac{mg}{l}\right) \quad (17)$$

Aus dieser Gleichung wird deutlich, dass die bei einer Auslenkung y auftretende Kraft proportional zu dieser sich verhält. Damit sind die Bedingungen für eine homogene Schwingung erster Näherung gegeben.

4.4 Die Kopplungslänge der Pendel

In 4.1 wurde bereits die Abhängigkeit der Schwebung der Pendel von den Kopplungsfedern beschrieben. Der ursprüngliche Ansatz bestand darin, verschiedene Schwebungen betrachten zu können, indem man verschiedene Federn mit unterschiedlichen Konstanten einsetzt.

Im Verlauf der Betrachtungen entstand die Idee, dass man die Schwebung auch stufenlos beeinflussen könnte, indem man die Reiter verstellt. Das würde sich wiederum auf die Kopplung der Pendel durch die Federn auswirken.

Professor Kobel gab daraufhin den Auftrag, diese Abhängigkeit zu untersuchen. Dabei sollten nur zwei gekoppelte Pendel untersucht werden, um Bewegungsgleichungen zum Vergleich zu haben und die Wurzel aus Schwebungsfrequenz pro Federkonstante in Abhängigkeit der Kopplungslänge l gemessen werden. Die Länge l ist dabei der Abstand von der Aufhängung des Pendels zum Reiter. Die Länge war für die Pendel jeweils gleich, d. h. es gab keine unterschiedlichen Längen zwischen den Pendeln bei einer Messung.

Zur Vereinfachung werden die Pendel Pendel1 und Pendel2 genannt.

Die Schwebungsfrequenz ω zweier Pendel wird so gemessen, dass die Amplituden der Pendel betrachtet werden. Man kann sich die Messung so vorstellen, dass Pendel1 angestoßen wird, während sich Pendel2 noch in Ruhelage befindet. Durch die Feder wird Energie an das Pendel2 gegeben, dieses beginnt zu schwingen. Die Amplitude von Pendel1 sinkt. Schließlich erreicht Pendel2 seine maximale Amplitude, wenn Pendel1 stillsteht. Nun kann man zählen wie oft Pendel2 in einer bestimmten Zeit stillsteht und daraus die Frequenz ω berechnen.

Tabelle 4: Messwerte-Abhängigkeit der Schwebung von der Kopplungslänge 27.4.07

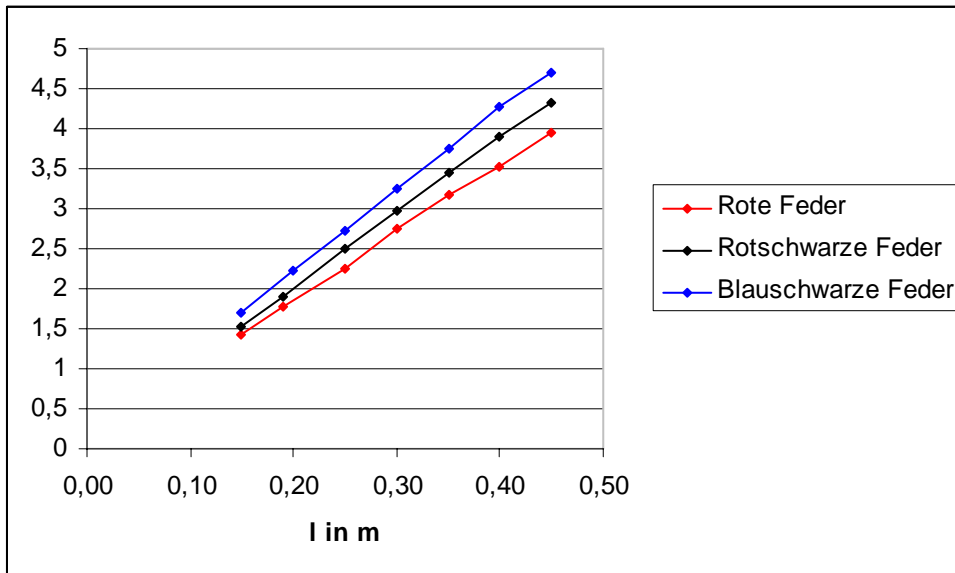
Rote Feder	l in m	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,19	0,15
	ω in Hz	0,1558	0,125	0,1010	0,0753	0,0508	0,0315	0,0202
Rotschwarze Feder	l in m	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,19	0,15
	ω in Hz	0,0375	0,0306	0,0238	0,0177	0,0125	0,0072	0,0047
Blauschwarze Feder	l in m	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20	0,15
	ω in Hz	0,0222	0,0182	0,0140	0,0105	0,0074	0,0049	0,0029

Professor Kobel vermutete, dass folgende Abhängigkeit linear sein müsste:

$$l \sim \sqrt{\frac{\omega}{k}} \quad (18)$$

Aus den Messwerten entstand nachfolgender Graph in Abbildung 5 (dabei wurden die Federkonstanten in N/mm umgerechnet, auf der y-Achse wird $\sqrt{\omega/k}$ aufgetragen (siehe Gleichung 18) mit der Einheit $\sqrt{\text{m}/\text{N} \cdot \text{s}}$).

Abbildung 5: Messwerte Kopplungslänge als Graphen



Die Vermutung scheint nach dieser Messung bestätigt zu sein. Alle drei Graphen verlaufen weitestgehend linear. Nicht eindeutig geklärt werden konnte, warum die Messreihen mit den Federn gestaffelt sind und warum die schwächste Feder die größten Werte im Graphen hat. Eine mögliche Erklärung wären Messfehler bei der Bestimmung der Federkonstanten. Weitere Messfehler sind darin zu sehen, dass die Frequenz per Hand mit einer Stoppuhr gemessen wurde und die Reaktionszeit eine gewisse zufällige Ungenauigkeit in die Ergebnisse bringt. Dasselbe trifft auch auf die Längenjustierung der Federn zu. Das Experiment lässt uns nun Rückschlüsse ziehen über die Schwebungsfrequenz. Sie ist proportional zu der Länge im Quadrat. Unter der Annahme, dass sich die Schwebungen von zwei und von drei Pendeln ähnlich sind, kann man nun die Schwebung in einem gewissen Rahmen einstellen. So müsste man eine Skala an die Pendelstangen anbringen, die eine wurzelförmige Zahlenfolge anzeigt. Wenn man nun die Kopplungslänge verdoppelt, erhöht sich die Schwebungsfrequenz um den Faktor 1,4. Diese neuen Möglichkeiten sind nur durch den gleichsinnigen Eigenmodus und die Federkonstanten, die den gegensinnigen Eigenmodus und den dritten Eigenmodus ausmachen, begrenzt.

5 Ausblick

Bisher wurden Neutrinos, ihre Oszillation, Federkonstanten, die homogene Schwingung erster Näherung bei schrägen Pendeln und die Einflussmöglichkeiten auf die Schwebung mit Hilfe der Veränderung der Kopplungslänge betrachtet und untersucht. Hypothesen wurden formuliert.

Nun bleibt die Aufgabe die Theorie mit der Praxis zu vergleichen. Für diesen Vergleich ist eine elektronische Schwebungserfassung in Arbeit. Hier wird mittels Lichtsensoren die Amplitude jeder einzelnen Schwingung jedes Pendels erfasst und als Schwebung ausgegeben. Diese Schwebung der Pendel muss dann mit der Überlagerung der Massenzustände der Neutrinos verglichen werden. Diese Überlagerung wird in der Theorie durch Matrizen beschrieben. Es soll weiterhin versucht werden, die Schwebung der Pendel so zu verändern, dass sie der Überlagerung der Massenzustände der Neutrinos formal so weit wie möglich ähnelt.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Experimente legen somit die Basis für die Anpassungsmöglichkeiten der Pendelschwebung. Mit der Kenntnis der Federkonstanten der verwendeten Federn, mit der Erkenntnis, dass es sich tatsächlich um eine homogene Schwingung erster Näherung handelt, und mit der Möglichkeit der Einflussnahme auf die Schwebungsfrequenz durch verschiedene Justierungen der Kopplungsfedern kann man in der späteren Arbeit die drei gekoppelten Pendel und ihre Schwebung gezielt verändern, um diese so besser an die Theorie anpassen zu können.

Ob gekoppelte Pendel auf die Theorie der Neutrino-Oszillation übertragbar sind, kann somit an dieser Stelle noch nicht beantwortet werden. Dazu sind weitere Experimente erforderlich, die im Rahmen der BeLL ausgeführt werden sollen.

6 Literatur- und Quellenverzeichnis

6.1 Buch

- [B1] Smart, N.: Weltgeschichte des Denkens. Die geistigen Traditionen der Menschheit. Primus Verlag, Darmstadt 2002, Seite 188
- [B2] Neutrinos: Botschafter aus dem Universum und dem Inneren der Materie. In: Kosmische Spurensuche. Astroteilchenphysik in Deutschland. Ein Forschungsgebiet im Aufbruch. Herausgegeben vom Komitee für Astroteilchenphysik (KAT), Juli 2006, S. 12 – 17.
- [B3] Grotelüschen, F.: Alles Quark: Das Standardmodell. In: Reise zum Urknall. Iser & Putscher Bad Honnef April 2000.
- [B4] Pausch, R.: BELL. Aufbau eines Praktikumsversuches zur Bestimmung der durchschnittlichen Lebensdauer von Myonen, 2006.
- [B5] Feynman, Richard P.: QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper Verlag GmbH München 1988.
- [B6] Grotelüschen, F.: Alles Quark: Das Standardmodell. In: Reise zum Urknall. Iser & Putscher Bad Honnef April 2000.

6.2 Internet

- [I1] Wikipedia: Aristoteles. URL: www.wikipedia.org/wiki/aristoteles [Stand: 13. Mai 2007]
- [I2] Wikipedia: Leukipp. URL: www.wikipedia.org/wiki/leukipp [Stand: 4. März 2007]
- [I3] Wikipedia: Demokrit. URL: www.wikipedia.org/wiki/demokrit [Stand: 13. Mai 2007]
- [I4] Wikipedia: Anaxagoras. URL: www.wikipedia.org/wiki/anaxagoras [Stand: 29. März 2007]
- [I5] Gleitz, M.; Kietzmann, N.: Geschichte der Atomtheorie bis zum Rutherford'schen Atommodell. Von der Antike bis 1789. URL: home.germany.net/101-92989/atom/arbeiten/gruppe1/arbeit41.htm#Antike [Stand: 16. Mai 2007]
- [I6] Daniel, R.; Kühn, J.; Moll, M.; Vetter, R.: Das Rutherford'sche Atommodell. URL: <http://home.germany.net/101-92989/atom/arbeiten/gruppe2/arbeit22.htm> [Stand: 16. Mai 2007]
- [I7] Solstice: Geschichte der Teilchenphysik - Von 1900 bis 1964. URL: http://solstice.de/grundl_d_tph/sm_gesch/sm_gesch_hist3.html [Stand: 18. Mai 2007]
- [I8] Heppner, D.; Polychronidis, K.: Das Bohrsche Atommodell. URL: <http://home.germany.net/101-92989/atom/arbeiten/gruppe3/arbeit32.htm> [Stand: 16. Mai 2007]
- [I9] ETH-Bibliothek. Das Neutrino. URL: <http://www.ethbib.ethz.ch/exhibit/pauli/neutrino.html> [Stand: 18. Mai 2007]
- [I10] Los Alamos Science Number 25, 1997: 1953-1956. The Reines-Cowan-Experiments. Detecting the Poltergeist. URL: <http://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00326606.pdf> [Stand: 28. Mai 2007]
- [I11] DESYs KwokQuark – Der Wissensdurst: Fermion: URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/fermion/wissensdurst2.html>; Tauon: URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/tauon/wissensdurst2.html>; Tau-Neutrino: URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/tauon/wissensdurst2.html>

- <http://www.kworkquark.net/lexikon/tauneutrino/wissensdurst2.html> [Stand: 30. Mai 2007]
- [I12] DESYs KwokQuark – Der Wissensdurst: Mesonen: URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/meson/wissensdurst2.html>; Baryonen: URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/baryon/wissensdurst2.html>; Neutrinos: URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/neutrino/wissensdurst2.html> [Stand: 30. Mai 2007]
- [I13] Bahcall, J.N.: Neutrinos from the sun. In: Scientific American, Volume 221, Number 1, Juli 1969. URL: <http://www.sns.ias.edu/~jnb/Papers/Popular/Scientificamerican69/scientificamerican69.html> [Stand: 3. Juni 2007]
- [I14] Langen, T.: Neutrinos, Universität Mainz, 19.06.06. URL: http://www.students.uni-mainz.de/tlangen/neutrinos_folien.pdf [Stand: 2. Juni 2007]
- [I15] Wikipedia: Tscherenkow-Licht. URL: http://de.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_Leuchten [Stand: 3. Juni 2007]
- [I16] DESYs KwokQuark: Der Wissensdurst: Gluonen. URL: <http://www.kworkquark.net/lexikon/gluon/wissensdurst2.html> [Stand: 6. Juni 2007]

6.3 Gespräche

- [G1] Kobel, M: Einleitung zu den Neutrinos. Mündliche Mitteilung, TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik, 27.10.2006
- [G2] Kobel, M: Supernova, Massenzustände. e-Mail-Mitteilung, 31.05.07
- [G3] Kobel, M: Homstake. e-Mail-Mitteilung, 3.06.07
- [G4] Pausch, G.: Homogene Schwingung bei Schräglage der Pendel. Mündliche Mitteilung, Januar 2007

7 Verzeichnis von Tabellen und Abbildungen

7.1 Tabellen

Tabelle 1: Standardmodell der Elementarteilchen	8
Tabelle 2: Messwerte der statischen Federkonstantenbestimmung 12.01.07	16
Tabelle 3: Messwerte der dynamischen Federkonstantenbestimmung 19.01.07	17
Tabelle 4: Messwerte-Abhängigkeit der Schwebung von der Kopplungslänge 27.4.07	21

7.2 Abbildungen

Abbildung 1: Skizze der gekoppelten Pendel.....	14
Abbildung 2: Dritter Eigenmodus der Pendel	15
Abbildung 3: Grenzen der Linearität der Federkraft	18
Abbildung 4: Kräfte am schrägen Pendel.....	19
Abbildung 5: Messwerte Kopplungslänge als Graphen.....	22