



# Facharbeit der Kollegstufe

Abiturjahrgang 2008/2010

Kurs: Physik

Kursleiter: Herr Gerd Hoffmann

Verfasser: Rupert Ernhofer

Thema: Elektromagnetische Induktion  
– Historische Experimente und  
mechanische Modelle

Abgabetermin: 29.01.10

Note: \_\_\_\_\_

Punkte: \_\_\_\_\_

Dem Direktorat vorgelegt am: \_\_\_\_\_

Punkte eingetragen am: \_\_\_\_\_

Unterschrift des Kursleiters: \_\_\_\_\_

## Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	4
2	Weltanschauung zur Zeit Faradays und Maxwells	4
2.1	Deutung im Viktorianischen England	4
2.2	Common Sense Philosophy	4
2.3	Mechanistisches Weltbild	5
3	Michael Faraday	5
3.1	Faradays Leben vor der Wissenschaft	5
3.2	Beginn der wissenschaftlichen Arbeit	5
3.3	Induktionsversuch	6
3.4	Tod und Charakter	6
4	James Clerk Maxwell	6
4.1	Kindheit	6
4.2	Schulbildung	7
4.3	Wissenschaftliche Arbeit	7
4.4	Letzte Werke und früher Tod	7
5	Faradays Induktionsversuch	8
5.1	Versuchsaufbau	8
5.2	Durchführung des Versuchs	9
5.3	Erklärungsprobleme	9
6	Maxwells Erklärung des Versuchs	9
6.1	Mechanistische Erklärung des Versuchs	10
6.2	Abwendung von der mechanischen Beschreibung	10
6.3	Erneute Modellentwicklung	11
6.4	Mögliche Gründe für die Entwicklung	11
7	Nachbau des Modells	11
7.1	Zahnräder	11
7.2	Rahmen	12
7.2.1	Rahmenteile	12
7.2.2	Verbindungen	13
7.2.3	Bohrprobleme	14
7.2.4	Rahmenmontage	14
7.2.5	Festlegen der Rotationsachse	15
7.3	Achsen	15
7.4	Zahnradmontage und Rahmenabstand	16
7.5	Unterbau	16

## Inhaltsverzeichnis Fortsetzung

7.6	Antriebs- und Bremscheiben	17
7.7	Gewichte	17
7.7.1	Verschiedene Gewichtsvarianten	17
7.7.2	Bau der Gewichte	18
7.8	Bremse	19
8	Funktionsweise des Modells	19
9	Wert des Modells	20
9.1	Vorteile des Modells	20
9.2	Nachteile des Modells	20
10	Grenzen von mechanischen Modellen	20

## **1 Einführung**

Elektromagnetische Induktion, ein Begriff, den die meisten nur aus dem Physikunterricht kennen, beschreibt ein Phänomen, bei dem sich die meisten nicht klar sind, welchen Stellenwert es in unserem Leben einnimmt. Elektrischer Strom ist alltäglich und unentbehrlich geworden, doch seine Entstehung ist immer, außer er stammt aus Batterien oder Photovoltaikanlagen, untrennbar mit Induktion verbunden. Durch die Induktion wird die Bewegungsenergie einer sich drehenden Generatorwelle in elektrische Energie umgewandelt. Ohne die Induktion würde also unsere gesamte Energieversorgung zusammenbrechen. Die Geschichte der Induktion begann, als Hans Christian Ørsted 1820 entdeckte, dass elektrischer Strom ein Magnetfeld erzeugt. Seit diesem Moment war man überzeugt, dass sich der Vorgang auch umkehren lässt. Zwei Physiker spielten bei der Entdeckung der Induktion eine herausragende Rolle: Michael Faraday und James Clerk Maxwell. Ihnen verdanken wir die Entdeckung und die mathematische Beschreibung. Die beiden ahnten wahrscheinlich nicht einmal, welche Bedeutung ihre Entdeckung einmal haben würde.

## **2 Weltanschauung zur Zeit Faradays und Maxwells**

### **2.1 Deutung im Viktorianischen England**

Zu der Zeit Faradays und Maxwells, der Regierungszeit Queen Viktorias von 1837-1901, war England von der immer weiter fortschreitenden Industrialisierung geprägt. Die Mechanik war als eine der ältesten Teilgebiete der Physik am weitesten entwickelt und konnte fast vollständig mathematisch beschrieben werden. Da lag es nahe, schwierige und unbekannte Sachverhalte mithilfe der Mechanik zu beschreiben.

### **2.2 Common Sense Philosophy**

Unterstützt wurde das auch von der schottischen Common Sense Philosophie, die unter anderem Maxwell, ein geborener Schotte, vertrat. Bei dieser wird davon ausgegangen, dass Gott die Natur im Inneren einfach gestaltet hat und nach den immer gleichen Grundregeln. Damit wurde es den Wissenschaftlern wesentlich erleichtert, unbekannte Zusammenhänge zu erschließen, da sie von einem Fachgebiet mithilfe von Analogien auf ein anderes schließen konnten. Der Mensch kann also trotz seines geringen Erkenntnisvermögens nur durch Intuition und seinen durch Erfahrung geschulten Verstand die Gesetze und Regeln der Natur verstehen. Bei der Common Sense Philosophie wird also auf bereits erforschte Bereiche zurückgegriffen und da die Mechanik am besten erforscht war, kam man auch hier zu dem Schluss, dass sie sich für Analogien am besten eigne.

### 2.3 Mechanistisches Weltbild

Der Zwang, alle Neuheiten als mechanische Modelle darzustellen, bringt Thomson auf den Punkt, als er die Frage „Verstehen wir das betreffende physikalische Problem oder verstehen wir es nicht?“ [(2)S. 179] durch die Frage „Können wir ein entsprechendes mechanisches Modell konstruieren?“ [(2)S. 179] ersetzt. Meist war es gar nicht so wichtig, dass ein Modell die Wirklichkeit korrekt wiedergab, sondern nur, dass es ein Modell gab, als Stütze um sich vorstellen zu können, wie die Natur beschaffen sein kann. Man kann geradezu von einem mechanistischen Weltbild sprechen, in dem Entdeckungen nur wichtig waren, wenn sie sich irgendwie in ein mechanisches Modell umwandeln ließen, das im allgemeinsten Fall aus bewegten, miteinander gekoppelten Massen bestand.

## 3 Michael Faraday

### 3.1 Faradays Leben vor der Wissenschaft



Abbildung 1

Michael Faraday wurde am 22. September 1791 in London geboren, seine Kindheit war geprägt von Entbehrungen. Dies liegt in der Krankheit seines Vaters begründet, der dadurch nur bedingt für seine Familie sorgen konnte. Er wuchs als Kind einer Arbeiterfamilie auf, sein Vater war Hufschmied. Die Familie zog erst kurz vor Michaels Geburt nach London, weil der Vater dort Arbeit zu finden hoffte. Seine Eltern waren tief gläubig und besuchten beide eine Kirche, die die Seligkeit der Armen predigte und den Faradays finanziell unter die Arme griff. Da Michael die Armut als Wille Gottes begriff und von seiner Mutter sehr fürsorglich behandelt wurde, hinterließ diese Kindheit keine Spuren an ihm. Kontakt mit den Naturwissenschaften bekam er während seiner Arbeit als Buchbinderlehrling, weil er die Bücher die er binden sollte oft las. Von einem Kunden bekam er deshalb das Angebot, eine Vorlesung von Sir Humphry Davy zu besuchen.

### 3.2 Beginn der wissenschaftlichen Arbeit

Er schrieb bei dieser Vorlesung alles detailliert mit, band seine Mitschrift und schenkte die Davy. Dieser wurde daraufhin auf Faraday aufmerksam und stellte ihn 1813 als

Assistent an. Als Laborassistent Davys lernte er die Chemie kennen und kam erst nach 1820 zur Physik. Er sollte einen Bericht über Ørsteds Versuch schreiben, diese Beschreibung war es, die ihn dazu, brachte Magnetfelder als Kraftlinien zu verstehen. Seit Arago 1825 den Effekt der elektromagnetischen Rotation beschrieb, bei der eine über einer rotierenden Kupferscheibe aufgehängte Kompassnadel zu rotieren beginnt, war Faraday von der Vorstellung überzeugt, dass Magnetismus und Elektrizität ineinander umwandelbar sein müssen. Nach weiteren Jahren mit Versuchen war schließlich die Grundlage für den Versuch geschaffen, der zu dem wichtigsten in seiner Karriere werden sollte.

### **3.3 Induktionsversuch**

In diesem Versuch, der laut seinem Tagebuch am 29. August 1831 stattfand, entdeckte er die elektromagnetische Induktion. Er verwendete dafür einen Versuchsaufbau, den wir heute als Ringkerntransformator bezeichnen würden. Nach diesem Versuch experimentierte Faraday bis ins hohe Alter weiter und machte immer wieder wichtige Entdeckungen, die aber nichts mit der Induktion zu tun haben und hier deshalb nicht weiter ausgeführt werden. Er lebte aber auch mit der Sorge, dass sein Werk die Elektrodynamik betreffend nicht beachtet würde, da seine Erkenntnisse zu sehr von den Ansichten der meisten Physiker abwichen. Zu den wenigen, die sein Werk zu schätzen wussten, gehörten William Thomson und vor allem James Clerk Maxwell. Letzterer nutzte Faradays Erkenntnisse um darauf aufbauend die mathematischen Formeln zu entwickeln, die heute einen Teil der Maxwellschen Gleichungen ausmachen.

### **3.4 Tod und Charakter**

Michael Faraday verstarb am 25. August 1867, nachdem er während seines Lebens sämtliche Ehrungen verweigert hatte und sogar darauf bestanden hatte, einfach nur mit Mr. Faraday angesprochen zu werden. Er wurde nicht in der Westminster Abbey beigesetzt, was eine große Ehre bedeutet hätte, sondern auf eigenen Wunsch auf dem Friedhof von Highgate begraben, wo seitdem ein einfacher Grabstein mit seinem Namen und seinem Geburts- und Todesdatum sein Grab ziert.

## **4 James Clerk Maxwell**

### **4.1 Kindheit**

James Clerk Maxwell wurde am 13. Juni 1831 in Edinburgh geboren, er gehörte im Gegensatz zu Faraday einer adligen schottischen Familie an, den Clerks of Penicuik. Sein Vater hatte Rechtswissenschaften studiert und betrieb nun ein landwirtschaftliches Gut. Seine Mutter verstarb als James acht Jahre alt war. Vielleicht auch dadurch beeinflusst entwickelte James ein enges Verhältnis zu seinem Vater.

## 4.2 Schulausbildung

Mit zehn Jahren zog James von dem väterlichen Landgut nach Edinburgh, um eine der Eliteschulen Schottlands zu besuchen und lebte seitdem bei seiner Tante. Er wurde oft von seinem Vater zu Vorträgen an der Royal Society of Edinburgh mitgenommen, die den jungen James stark prägten. Er betrieb schon früh Untersuchungen in der Optik und der Farbenlehre, aber für eine erfolgreiche Karriere als Naturwissenschaftler im damaligen



Abbildung 2

England musste man ein Studium in Cambridge mit Examen abgeschlossen haben. Dieses legte er 1854 als Zweitbester seines Jahrgangs ab.

## 4.3 Wissenschaftliche Arbeit

Bis er sich 1856 mit Erfolg um den Lehrstuhl für Physik am Marishal College in Aberdeen bewarb, blieb er weiter in Cambridge. Er forschte neben der Optik und der Mechanik unter anderem auch auf dem Gebiet der Elektrizitätslehre. Hier kam er zum ersten Mal mit der Arbeit Faradays in Kontakt. Er bat William Thomson darum, ihm eine gute Lektüre zum Einstieg in die Elektrizitätslehre zu empfehlen, worauf dieser ihm besonders das Werk Faradays ans Herzen legte. Da er Faradays Kraftlinien zum Teil bereits selbst mathematisch behandelt hatte, war er sich ihrer physikalischen Bedeutung sicher. Maxwell übernahm, nachdem das Marishal College 1860 mit einem anderen College zusammengelegt worden war, den Lehrstuhl für Physik und Astronomie am King's College in London, den er bis 1865 innehatte. In diesem Jahr zog er sich, nachdem er öfter krank gewesen war, auf das Gut Glenlair zurück, auf dem er schon seine Kindheit verbracht hatte.

## 4.4 Letzte Werke und früher Tod

Da er finanziell ausgesorgt hatte, benötigte er die Professur mit den ungeliebten Vorlesungen nicht mehr. 1871 wurde er zu seiner letzten Professur an das Cavendish Laboratorium in Cambridge berufen, das sich gerade im Aufbau befand und deshalb wesentlich nach Maxwells Vorstellungen gestaltet wurde. Durch seine Position als Leiter des Laboratoriums musste er einen Großteil der Öffentlichkeitsarbeit leisten. Diese bestand zum Teil daraus, die wichtigsten physikalischen Artikel für die „Encyclopaedia

Britannica“ zu schreiben, aber auch die wissenschaftliche Auswertung und Veröffentlichung des Nachlasses von Henry Cavendish fielen darunter.

Maxwell erlag am 5. November 1879 mit nur 48 Jahren einem Magenkrebsleiden. Im Gegensatz zu Faraday, der Angst hatte, dass seine wichtigen Erkenntnisse in Vergessenheit geraten würden, war es Maxwell nicht klar, welche Auswirkungen seine Elektrodynamik und auch seine Farbenlehre auf die Medien einmal haben würden.

## **5 Faradays Induktionsversuch**

Faraday, der fest davon überzeugt war, dass Magnetismus und Elektrizität ineinander umwandelbar sind, machte am 29. August 1831 einen Versuch, bei dem er die elektromagnetische Induktion entdeckte. Der Versuchsaufbau und -hergang wird in seinem Labortagebuch sorgsam beschrieben, diese Beschreibung wird im folgenden ausgeführt.

### **5.1 Versuchsaufbau**

Er benutzte einen ca. 15 cm großen Weicheisenring, auf den er zwei Spulen aus Kupferdraht wickelte. Diese Spulen waren gegen den Ring isoliert und, da gegenüber liegend, räumlich voneinander getrennt. Die Spule auf der sekundären Seite verband er mit einer längeren Leiterschleife. Diese ließ er über eine Kompassnadel laufen. Um die Einwirkungen des Magnetfeldes des Ringes auf die Kompassnadel möglichst gering zu halten, hielt er einen Abstand von einem Meter zum Ring. Dies war die gleiche Anordnung, wie sie Ørsted in seinem Versuch verwendet hatte. Die primäre Spule bestand aus drei gleich langen Teilen, die sich beliebig einzeln oder als gemeinsame Spule betreiben ließen. Die drei Primärspulen hatten zusammen etwa die gleiche Windungszahl wie die sekundäre. An die Primärseite konnte Faraday zur Stromversorgung eine Voltasche Säule anschließen.



*Originalring, den Faraday bei seinen Versuchen benutzte, aufbewahrt im London Science Museum*

**Abbildung 3**



## 5.2 Durchführung des Versuchs

Im ersten Durchgang verwendete er auf der Primärseite nur eine der drei Spulen und im Moment der Schließung des Stromkreises schlug die Nadel auf der Sekundärseite kurz leicht aus. Als er den Kontakt wieder löste, schlug die Nadel ein zweites Mal aus. Im zweiten Durchgang verwendete er auf der Primärseite alle drei Spulen, die er in Reihe schaltete. Der Effekt auf die Nadel war bis auf den Unterschied, dass die Nadel jetzt sehr viel stärker ausschlug, der gleiche wie beim ersten Mal. Der Grund hierfür ist in den Gesetzen über die Funktionsweise von Transformatoren zu suchen. Der Eisenring mit den Kupferspulen war genauso aufgebaut wie heutige Ringkerntransformatoren, deshalb verwundert es, dass das Patent für die Erfindung des Transformators erst 50 Jahre später erteilt wurde. Über die Gründe, wieso Faraday das Transformatorprinzip nicht weiter verfolgte, kann nur gemutmaßt werden. Beim dritten Durchgang ersetzte Faraday das einfache Stück Draht über der Nadel durch eine Spule, die er rechtwinklig zur Grundposition der Nadel ausrichtete, sodass ein maximaler Ausschlag erzeugt werden konnte. Wie erwartet wurde die Nadel bei sonst gleicher Versuchsanordnung durch die Spule beim Einschalten sehr viel stärker ausgelenkt als zuvor. Hier beschreibt Faraday auch das erste Mal, dass die Nadel beim Ausschalten des Stroms in die entgegengesetzte Richtung ausgelenkt wird wie beim Einschalten. Faraday hat bei diesem Versuch das Prinzip der elektromagnetischen Induktion entdeckt und es geschafft, seine schon 1822 notierte Idee, Magnetismus in Elektrizität „umzuwandeln“, zu verwirklichen.

## 5.3 Erklärungsprobleme

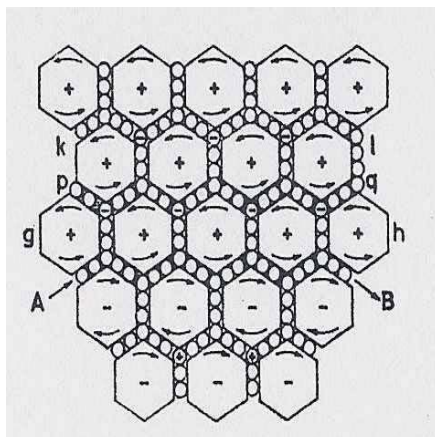
Da Faraday nie ein Mathematikstudium oder Ähnliches besucht hatte und sein Einstieg in die Physik auch noch über die Chemie verlaufen war, hatte er nur äußerst spärlichen Kontakt zur theoretischen Physik. Dadurch war er nicht in der Lage, seine Versuchsergebnisse so zu beschreiben und vor allem zu interpretieren, dass sie der großen Mehrheit der damaligen Physiker als betrachtenswert erschienen. Zu seinem Pech entsprach seine Idee von Kraftlinien zur Beschreibung von magnetischen Feldern auch nicht den damaligen Vorstellungen in der Physik.

## 6 Maxwells Erklärung des Versuchs

Maxwell veröffentlichte 1856 sein erstes Werk über die Elektrizität mit dem Namen „On Faraday's Lines of Force“, in dem er sich mit Faradays Darstellung der elektromagnetischen Kräfte als Kraftlinien beschäftigte. Beeinflusst von der Grundidee des mechanistischen Weltbilds und aus dem Grund der Vereinfachung verglich Maxwell die Kraftlinien mit dem Strömungsfeld einer idealen Flüssigkeit.

### 6.1 Mechanistische Erklärung des Versuchs

In seiner zweiten Publikation „On Physical Lines of Forces“ aus dem Jahr 1861 betrachtete er die Kraftlinien nun von mechanischer Seite aus als rotierende Wirbel. Hier sieht man wieder die Auffassung, dass alles mit der Mechanik erklärbar ist. Maxwell geht in seiner Modellvorstellung so weit, dass er damit das gesamte Phänomen der Induktion erklärt. Er ging davon aus, dass diese Wirbel sehr nahe beieinander liegen, sich die Drehrichtung durch das Vorzeichen der an dieser Stelle herrschenden magnetischen Flussdichte bestimmt und die Oberflächengeschwindigkeit der Wirbel der Stärke der Flussdichte entspricht. Das Problem, dass sich nebeneinander liegende Wirbel gegenseitig hemmen, löste Maxwell, indem er zwischen die Wirbel sehr viel kleinere Rollen setzte. Diese Rollen waren, wenn die Wirbel Materie durchdrangen auch für den Ladungstransport zuständig. Sich ändernde Magnetfelder, wie beispielsweise beim Anlegen einer Spannung an eine Spule, haben bei dem Modell die Auswirkung, dass die stehenden Wirbel von einer Seite ausgehend beginnen mit zunehmender Geschwindigkeit zu rotieren, bis sie ihre der Feldstärke entsprechenden Maximalgeschwindigkeit erreicht haben. Bis das Magnetfeld konstant ist, besteht zwischen benachbarten Wirbeln ein Geschwindigkeitsunterschied, der die dazwischen liegenden Rollen von der Stelle bewegt. Die Rollenbewegung wird von Maxwell als Stromfluss betrachtet. Dieser Stromfluss tritt nur auf, solange sich das Magnetfeld ändert und wird als Induktionsstrom bezeichnet. Mithilfe dieser Modellvorstellung gelang es Maxwell, die Gleichungen aufzustellen, die später als die Maxwellschen Gleichungen bekannt werden sollten.



*Darstellung von Maxwells Molekularwirbeln und den dazwischen liegenden Torsionsrollen, die Drehrichtung der Wirbel lässt auf die Ausrichtung des Magnetfelds schließen*

**Abbildung 4**

### 6.2 Abwendung von der mechanischen Beschreibung

1864 veröffentlichte Maxwell sein nächstes Werk die Elektrodynamik betreffend, mit dem Titel „A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field“. Die Publikation besaß nun die Neuheit, dass fast keine mechanischen Analogien und Modelle mehr zur Interpretation verwendet wurden. Darin veröffentlichte er auch die Maxwellschen Gleichungen.

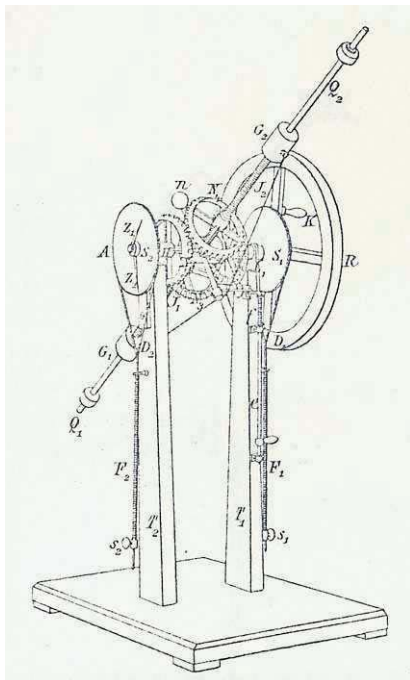
### 6.3 Erneute Modellentwicklung

Obwohl sich Maxwell so weit wie möglich von mechanischen Modellen zur Interpretation verabschiedete, entwickelte er 1874 doch wieder ein Modell, um erneut Faradays Induktionsversuch darzustellen. Der Unterschied zwischen diesem neuen Modell und dem alten liegt darin, dass er dieses Mal nicht den allgemeinen Fall der Induktion im Leiter darstellte, sondern im Speziellen die Abhängigkeit von induzierendem Strom, Magnetfeld und Induktionsstrom voneinander. Dabei ging er nicht genauer auf die Vorgänge im Material ein.

### 6.4 Mögliche Gründe für die Entwicklung

Er veröffentlichte dieses Modell, während er in leitender Position am Cavendish Laboratorium tätig war. Deshalb kann davon ausgegangen werden, dass er damit die Induktion einem breiten Publikum zugänglich machen wollte, um damit die Wissenschaft interessanter und verständlicher zu machen. Die Entstehung eines Nachbaus dieses Modells wird im Folgenden ebenso beschrieben wie die Funktion und die Vor- und Nachteile der Modellvorstellung.

## 7 Nachbau des Modells



Diese Zeichnung soll eine Vorstellung darüber geben, wie das Modell am Ende in etwa aussehen soll. Wichtigstes Bauteil ist das im Zentrum angebrachte Differential. Da die ordnungsgemäße Funktion des Modells wesentlich von dem Funktionieren dieses Differentials abhängt und außerdem die restlichen Bauteile um dieses herum montiert werden, habe ich die Planung und den Bau des Modells hier begonnen.

Abbildung 5

### 7.1 Zahnräder

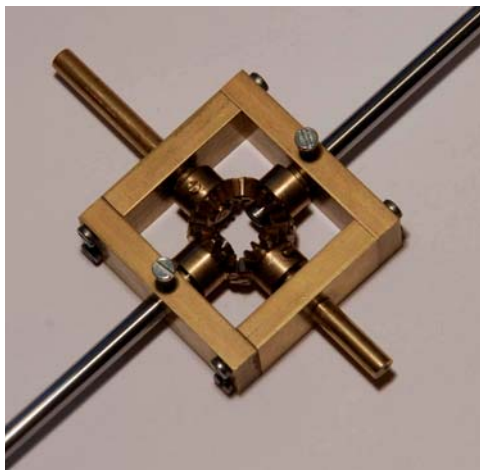
Die Größe des Differentials ist von der Größe der verwendeten Kegelräder abhängig. Ich verwendete hier Kegelräder aus Messing mit 15 Zähnen der Größe Modul 0,5 mit einer 4mm Bohrung. Diese kaufte ich fertig, da das selbst Anfertigen mit meiner

Werkstattausrüstung nicht möglich war und ich mir so außerdem sicher sein konnte, dass die Fertigungstoleranzen zwischen den vier benötigten Kegelrädern absolut zu vernachlässigen sind. Die ersten selbst angefertigten Teile waren für den Rahmen, in den das Differential eingebaut wurde.



**Abbildung 6/7**

## 7.2 Rahmen



*Fertiger Rahmen mit eingesetzten Kegelrädern und endgültigen Stahlachsen, gut erkennbar ist die quadratische Grundform*

Um die benötigte Größe des Rahmens zu ermitteln, setzte ich die Kegelräder so zusammen, wie sie später eingebaut wurden, und nahm die Außenmaße der Kegelräder, die gleichzeitig die minimalen Innenmaße des Rahmens sind. Die Messung ergab hier ca.

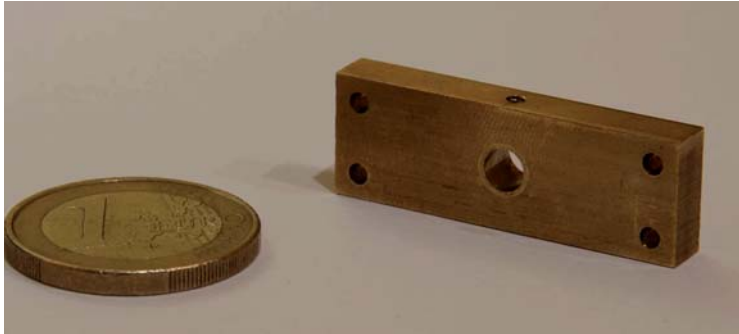
**Abbildung 8**

23mm. Da dies aber der Minimalwert ist und es durchaus sein konnte, dass die Abstände zwischen den Kegelrädern im fertigen Zustand für eine reibungsarme Kraftübertragung größer sein müssen und auch unbeabsichtigte Fertigungstoleranzen die Größe des Rahmens verringern können, beschloss ich, die Innenmaße des quadratischen Rahmens auf 25x25mm zu erhöhen. Um das durch diese Maßnahme wahrscheinlich entstehende Spiel zwischen Kegelrädern und Rahmen zu verringern, hatte ich vor gegebenenfalls Unterlegscheiben zwischen Rahmen und Kegelrad einzusetzen.

### 7.2.1 Rahmenteile

Den Rahmen baute ich aus 12x5mm starkem Messingprofil, dieses ist massiv genug um die vermutlich auftretenden Fliehkräfte zu verkraften und außerdem leicht zu verarbeiten. Der Rahmen besteht aus vier Einzelteilen, von denen jeweils die zwei gegenüber liegenden gleich lang sind. Das längere der beiden Bauteile ist 35mm lang. Das große mittig angebrachte Loch hat einen Durchmesser von 4mm und wird später die Achse aufnehmen, bei der am einen Ende ein Kegelrad und am anderen Ende das verschiebbare Gewicht sitzt. Diese Achse wird durch eine M2 Schraube, die in dem an der schmalen Langseite angebrachten Loch mit Innengewinde sitzt, fixiert werden. Die in jeder der vier

Ecken eingebrachten Löcher besitzen einen Durchmesser von 2mm und dienen der Aufnahme der Schrauben, die den Rahmen zusammenhalten.



*Das große Rahmenteil, Länge 35mm, oben erkennbar die Gewindebohrung zum fixieren der Achse durch die große Bohrung*

**Abbildung 9**

Zwischen diesen zweifach vorhandenen Rahmenteilern sitzen die beiden anderen Rahmenteilern, auch diese sind beide gleich aufgebaut.



*Das kleine Rahmenteil, Länge 25mm, an der vorderen Seite sind die M2 Gewindebohrungen zur Verbindung sichtbar*

**Abbildung 10**

Die Teile sind nur 25mm lang und ergeben zusammen mit den eben beschriebenen 35mm langen Teilen den quadratischen Grundriss. Auch diese kleineren Rahmenteilern besitzen in der Mitte der größten Seitenfläche eine Bohrung von 4mm, ebenfalls zur Aufnahme einer Achse. Diese Achse besitzt wiederum an einem Ende ein Kegelrad, auf der anderen Seite jedoch wird das Antriebs- bzw. Bremsrad montiert werden. Weil sich diese Achse im Rahmen drehen können muss, fehlt an diesem Teil die M2 Bohrung für die Befestigungsschraube. Damit die Achse hier sicher fixiert ist und auch weil die Kegelräder von dieser Achse angetrieben werden sollen, werden die Kegelräder beim Zusammenbau mit der Achse verstiftet werden. Um den Rahmen montieren zu können sind an den Stirnseiten der kleineren Teile je zwei Innengewinde der Größe M2 angebracht. Diese vier Teile fertigte ich auf einer kleinen Tischfräse an. Wo Innengewinde nötig waren, bohrte ich ein Kernloch mit 1,5mm Durchmesser, in das ich danach mit einem Handgewindebohrer das nötige Gewinde schnitt.

### **7.2.2 Verbindungen**

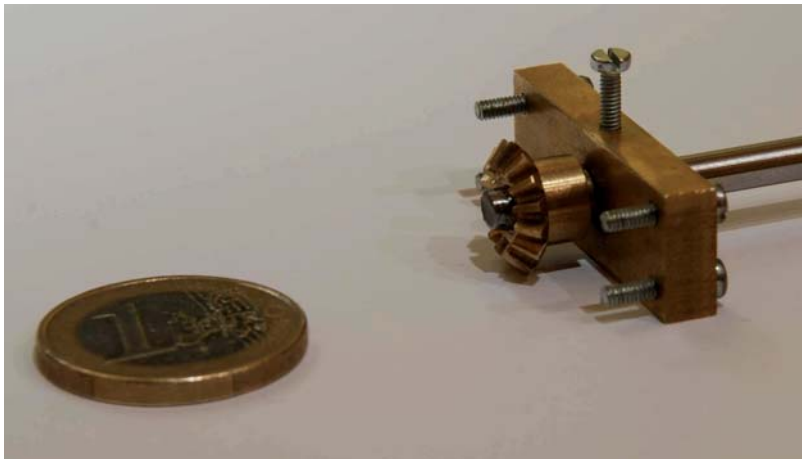
Ich entschied mich dazu, an dem Modell, bis auf die Verstiftung der zwei Zahnräder, sämtliche Verbindungen als Schraubverbindungen auszuführen. Das hat den Vorteil, dass man sie zu Wartungs- oder Reparaturzwecken jederzeit wieder lösen kann, ohne Teile beschädigen zu müssen. Die Teile des Rahmens fügte ich an jeder Verbindungsstelle mit zwei Schrauben zusammen.



*Hier ist die Verstiftung des Antriebszahnrad auf der Achse mithilfe eines verpressten 1,5mm Rohres sichtbar.*

**Abbildung 11**

Mit nur einer Schraube pro Verbindung hätten die kürzeren Teile des Messingrahmens möglicherweise um die Schrauben rotiert. Damit wäre eine präzise Ausrichtung der Kegelräder zueinander nicht mehr möglich gewesen.



*Großes Rahmenteil mit montierter Achse, Kegelrad und eingesetzten M2 Schrauben, fertig zur Endmontage*

**Abbildung 12**

### 7.2.3 Bohrprobleme

Durch die Entscheidung pro Verbindung zwei Schrauben zu verwenden, tat sich ein neues Problem auf. Jede der beiden Gewindebohrungen musste exakt mittig mit einem Abstand von 2,5mm zu den beiden Seiten, gebohrt werden. Wenn nun bei einem der Löcher der Bohrer verläuft, dann sitzt dieses Teil später schief im Rahmen und sorgt dafür, dass die Achse, die durch dieses Teil läuft um ein paar Grad aus der eigentlichen Achsenebene herausragt und damit eine reibungsarme Kraftübertragung zwischen den Kegelrädern nicht mehr möglich ist. Dies würde die Funktion des Modells wesentlich einschränken. Ich löste das Problem des verlaufenden Bohrers, indem ich anhand mehrerer Probebohrungen herausfand, dass der Bohrer durch einen Konstruktionsfehler der zum Bohren verwendeten Fräse immer in die gleiche Richtung verläuft. Nachdem mir das Problem bekannt war, löste ich es, indem ich bei der Ausrichtung des Bohrers schon mit einkalkulierte, dass der Bohrer um einen gewissen Wert verläuft. So gelang es mir schließlich, die acht Bohrungen für die Gewinde an den richtigen Stellen zu setzen.

### 7.2.4 Rahmenmontage

Als nächstes setzte ich die vier Teile des Rahmens mit acht Schrauben zusammen und überprüfte die Toleranzen der 4mm Bohrungen, die als Lager für die Achsen dienen. Diese lagen aber alle in einem Bereich, in dem nicht davon auszugehen war, dass sie die Funktion des Modells negativ beeinflussen können. Jetzt wurden die vier Achsen

eingesetzt. Die zwei, die später durch die beiden kurzen Rahmenteile verlaufen, bilden die Rotationsachse des Differentials.

### **7.2.5 Festlegen der Rotationsachse**

Zu der Entscheidung die Rotationsachse durch diese beiden Teile und nicht durch die 35mm langen Teile zu legen, kam ich nach ein paar Gedankenspielen, bei denen diese Anordnung immer von Vorteil war. Einmal werden bei dieser Anordnung auf die Rahmenschrauben nur Zug- und Druckkräfte ausgeübt, eine Belastung für die die Schrauben ausgelegt sind, während bei der Version mit der Rotationsachse durch die großen Rahmenteile auf die Schrauben hauptsächlich Querkräfte wirken würden. Für solche Kräfte sind die Schrauben nicht ausgelegt und würden damit erhöhter Materialermüdung unterliegen. Dieser eigentlich nur theoretische Ansatz spielte bei der Entscheidung der Drehachse kaum eine Rolle, wird aber bei größeren Maschinen durchaus berücksichtigt, da dort die wirkenden Kräfte im Verhältnis zu den Befestigungselementen wesentlich größer sind als bei dem vorliegenden Modell. Da aber die theoretische Überlegung in beiden Fällen gleich ist, finde ich die Erwähnung hier durchaus angebracht. Der zweite, entscheidende Grund für die Festlegung der Drehachse war die Zugänglichkeit der Schrauben beim Zusammenbau oder im Falle einer späteren Wartung. In der realisierten Version liegen die Schraubenachsen nämlich parallel zu den Achsen, auf denen später die Gewichte montiert werden, und sind damit leicht mit dem Schraubendreher zu erreichen. Würde die Rotationsachse durch die beiden großen Rahmenelemente verlaufen, würden die Schrauben in ihrer Verlängerung auf die Antriebs- und Bremsscheiben und die Aufhängungen des Modells zeigen, das Montieren oder Demontieren der Schrauben mit einem Schraubendreher würde daran scheitern, dass der Schraubendreher sich nicht richtig oder gar nicht auf den Schraubenkopf setzen ließe. Das einfache Lösen oder Festziehen der Schrauben würde damit zum nervenaufreibenden Geduldspiel oder die komplette Demontage von Antriebs- und Bremsscheiben sowie Aufhängungen voraussetzen.

### **7.3 Achsen**

Die Achsen, an die später die Gewichte montiert werden, bestehen aus Silberstahl, da sie später den durch die Gewichte verursachten Drehmomenten standhalten müssen. Sie sind jeweils 50cm lang und haben einen Durchmesser von 4mm. Die beiden Antriebsachsen bestehen aus 4mm Messingrundprofil, da maximal die Masse des Differentials mit den beiden Gewichten gestützt werden muss. Die Abstände zu den Aufhängungen betragen nur 5cm, deshalb müssen die Achsen nicht so großen Kräften standhalten. Folglich verwendete ich das kostengünstigere Messing.

#### 7.4 Zahnradmontage und Rahmenabstand

Auf jede Achse montierte ich das zugehörige Kegelrad, dabei stellte ich fest, dass die Idee, den Rahmen etwas größer als berechnet zu bauen, sich als sehr gut erwiesen hat, da die Kegelräder tatsächlich etwas mehr Platz benötigen um sich problemlos zu drehen.



*Zwei montierte Kegelräder, gut sichtbar das Spiel beim ineinander Greifen der Zähne, das notwendig ist, um die Bautoleranzen reibungsarm zu überwinden*

**Abbildung 13**

Ursache dürfte unter anderem auch die Summe der Toleranzen sein, die dafür sorgen, dass die Kegelräder nicht perfekt ineinander greifen. Die passenden Abstände zwischen Rahmen und Kegelrädern erreichte ich durch das Einfügen von passend angefertigten



Unterlegscheiben aus einem 5mm Messingrohr. Um einen optimalen Betrieb zu ermöglichen, feilte ich die Unterlegscheiben für jedes Kegelrad individuell auf das nötige Maß.

**Abbildung 14**

#### 7.5 Unterbau



Jetzt baute ich die Unterkonstruktion auf. Es handelt sich hierbei um eine Holzplatte mit den Maßen 60x30cm. Auf diese montierte ich mit Stahlwinkeln zwei Holzleisten mit einer Länge von knapp 65cm. In diese bohrte ich am oberen Ende jeweils ein Loch mit 5mm Durchmesser und setzte je eine Buchse aus Messingrohr mit 4mm Innendurchmesser ein. Durch diese führte ich die Antriebsachsen und fixierte diese mit Feststellringen.

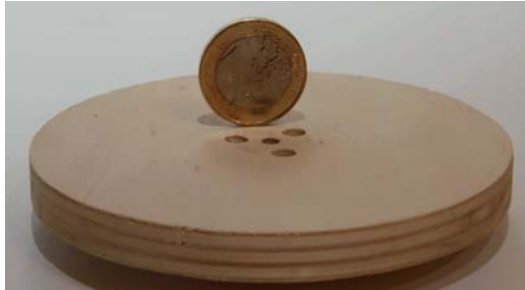
*Der Unterbau, in die beiden Buchsen am oberen Ende werden die Achsen des Differentials gesteckt*

**Abbildung 15**



## 7.6 Antriebs- und Bremsscheiben

An das äußere Ende der Antriebsachsen montierte ich je eine Holzscheibe, die als Antriebs- bzw. Bremsrad dient. Sie haben jeweils einen Durchmesser von ca. 10 cm bei einer Dicke von 10 mm.



*Eine der beiden Holzscheiben, in der Mitte unter dem Euro sind die drei Löcher für die M2 Schrauben und das für die 4mm Achse zu sehen*

**Abbildung 16**

Um die Holzscheiben zu befestigen fräste ich aus 20mm Messing-Rundmaterial Mitnehmerscheiben, auf denen mit drei M2 Schrauben die Holzscheiben montiert werden. Die Mitnehmer selbst werden mit einer weiteren M2 Schraube auf der Achse festgesetzt. Die verwendeten Schrauben sind wieder in individuell angefertigten Gewinden geführt.



*Eine der Mitnehmerscheiben, mit den drei linken Schrauben wird die Holzscheibe befestigt, mit der rechten Schraube die Scheibe auf der Achse festgeklemmt*

**Abbildung 17**

Das Antriebsrad erhält eine Kurbel, indem nahe am Rand eine mit Schrumpfschlauch überzogene Holzschraube eingesetzt wird. In den Rand des Bremsrads fräste ich eine Nut, in der später das Seil zum Bremsen läuft.

## 7.7 Gewichte

Die nächsten und letzten Bauteile sind die beiden Gewichte. Sie müssen gleiche Masse haben und rotationssymmetrisch zu der durch die Mitte des Gewichts verlaufenden 4mm Bohrung sein. Diese Anforderungen, vor allem die mittige 4mm Bohrung, ließen fast keine andere Wahl als den Selbstbau.

### 7.7.1 Verschiedene Gewichtsvarianten

Zur Auswahl standen zwei verschiedene Methoden. Die erste, aus einem Stück Drehstahl oder ähnlichem Stück Metall zwei gleich schwere Teile zu fertigen und dann auch noch zentral durch das gesamte Bauteil eine 4 mm Bohrung zu treiben, scheiterte an den hohen Kosten des Materials und den nicht vorhandenen Bearbeitungsgeräten. Die verwendete Methode ist nun eine gänzlich andere: Genau wie bei großen Gewichten, wie sie bei Kränen benutzt werden, sind die Gewichte aus Beton gegossen.

### 7.7.2 Bau der Gewichte

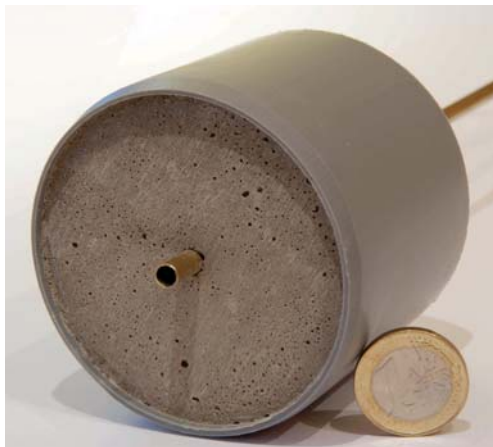


Das Gewicht ist folgendermaßen aufgebaut: Es besitzt eine Hülle aus einem 75 mm Abflussrohr, in das ich Beton goss. Im Zentrum sitzt ein Messingrohr mit 4 mm Innendurchmesser für die Führung auf der Silberstahlachse. Um das Rohr zentral zu platzieren, damit es sich während des mehrstündigen Aushärtungsprozesses nicht verschob, baute ich eine Gussform aus Holz.

*Die fertige Gussform mit  
eingesetztem 4mm und  
75mm Rohr, bereit zum  
Befüllen*

**Abbildung 18**

Diese besteht aus zwei Teilen, einem Boden und einem Deckel. Beide Teile haben zentral eine Bohrung für das 4mm Rohr und eine dazu konzentrische Nut zur Aufnahme des Abflussrohres. Der Boden ist auch noch dafür verantwortlich, die Form nach unten abzudichten. Der Deckel hat Aussparungen um das Einfüllen des Betons und das Überwachen des Aushärtens zu ermöglichen. Die Größe der Gewichte lässt sich variieren indem man verschieden hohe Rohrstücke verwendet bzw. die Füllhöhe des Betons verändert. Nach dem Aushärten löst sich das Gewicht leicht von der Holzform und durch die Plastikhülle ist es gut vor Beschädigungen geschützt. Der größte Vorteil jedoch ist, dass die Gewichte kostengünstig sind, da Abflussrohre und Beton im Baumarkt preiswert



zu bekommen sind. Auf den Achsen werden die Gewichte später durch zwei Feststellringe, auf jeder Seite des Gewichts einer, befestigt und sind dadurch auch problemlos verschiebbar.

*Ein aus der Form gelöstes Gewicht,  
nach dem Kürzen des Messingrohrs  
ist es einsatzbereit*

**Abbildung 19**



### 7.8 Bremse

Als letztes montierte ich nun noch die Bremse für die Bremsscheibe. Sie besteht aus einfacher Paketschnur, die ich an einer Holzschraube an einer der zwei Streben, die das Modell halten, befestigte. Die Schnur läuft nun über die Nut in der Bremsscheibe zurück zur Schraube und ist dieses Mal mit einem variablen Gummiband an ihr befestigt. Das Gummiband sorgt für den notwendigen Anpressdruck für das Bremsen und die Bremswirkung kann durch Verstellen des Gummibands verändert werden.

*Das fertige Modell,  
vollständig montiert*

**Abbildung 20**

### 8 Funktionsweise des Modells

Die Drehfrequenz des Antriebsrads entspricht der Stromstärke im induzierenden Stromkreis, die Drehfrequenz des Bremsrads der Stärke des Induktionsstroms im Sekundärkreis und die Drehfrequenz der Gewichte der Stärke des Magnetfeldes. Das Anschalten des Stroms in der Primärspule entspricht nun also dem Drehbeginn des Antriebsrads. Beim Versuch hat das die Auswirkung, dass der Induktionsstrom sprunghaft ansteigt. Im Modell wird das dargestellt, indem das Bremsrad unmittelbar zu drehen beginnt, und zwar entgegengesetzt der Richtung des Antriebsrads. Dies entspricht dem Induktionsstrom, der versucht seine Ursache zu hemmen. Je weiter der Aufbau des Magnetfeldes fortgeschritten ist, desto geringer wird der Induktionsstrom, bis er schließlich aufhört. Im Modell wird mit der Bremsung des Bremsrads durch das Seil die Rotation des Differentials mit den Gewichten herbeigeführt, bis sich nur noch die Gewichte und das Antriebsrad drehen. Die Bremsung des Bremsrads im Modell entspricht dem elektrischen Widerstand im Leiter beim Versuch. Jetzt ist sowohl beim Versuch als auch in der Modellvorstellung der Aufbau des Magnetfeldes abgeschlossen. Das Öffnen des Stromkreises der Primärspule wird im Modell durch das plötzliche Anhalten des Antriebsrads simuliert. Im Versuch führt das zu einem erneuten Induktionsstromstoß bis das Magnetfeld abgebaut ist. Genau das passiert auf das Modell

übertragen auch. Die Bremsscheibe beginnt exakt in dem Moment, in dem das Antriebsrad angehalten wird, sich zu drehen, aber in die entgegengesetzte Richtung wie am Anfang. Sie wird dabei immer langsamer, da die kinetische Energie der Rotationsbewegung der Gewichte kontinuierlich durch die Reibungsarbeit an der Bremse in Wärmeenergie umgewandelt wird, bis keine Energie mehr vorhanden ist, was dem abgebauten Magnetfeld entspricht.

## **9 Wert des Modells**

### **9.1 Vorteile des Modells**

Von Vorteil ist bei dem Modell ganz klar, dass Vorgänge, die bei dem Versuch von Faraday nur durch Messinstrumente sichtbar gemacht werden können, wie der Auf- und Abbau des Magnetfeldes, bei dem Modell unmittelbar zu beobachten sind. Durch die Tatsache, dass sowohl der Zustand des Magnetfelds als auch der des Induktionsstroms und des induzierenden Stroms ständig sichtbar ist, ist es mit dem Modell wesentlich leichter, auch als Laie die Zusammenhänge zwischen diesen drei Größen zu verstehen. Durch das Darstellen des Magnetfelds als rotierende Gewichte wird auch klar gemacht, dass in ihm Energie gespeichert wird, die wieder in Strom umgewandelt werden kann.

### **9.2 Nachteile des Modells**

Ein Nachteil des Modells ist, dass es in keiner Weise darstellt, was im Material passiert oder wie man sich Induktion nun vorzustellen hat. Der Versuch wird als Ganzes in ein Modell umgewandelt, das man nicht in einzelne Vorgänge zerlegen kann. Im Versuch hingegen findet der Aufbau des Magnetfelds auch statt, wenn es keinen Sekundärkreis gibt. Man tendiert auch dazu, in die Sackgasse zu laufen, sich in Zukunft jedes physikalische Phänomen als mechanisches Modell vorstellen zu wollen, was in den seltensten Fällen funktioniert.

## **10 Grenzen von mechanischen Modellen**

Man kann sagen, dass die Idee, Induktion als mechanisches Modell darzustellen, in der damaligen Zeit notwendig war, vor allem um den Gewohnheiten der damaligen Physiker gerecht zu werden. Inzwischen, nach der Entdeckung des Elektrons, der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik, ist man jedoch an einem Punkt angelangt, an dem es keinen Sinn mehr macht, neue Effekte durch mechanische Modelle anschaulich machen zu wollen. Die Modelle waren im Viktorianischen Zeitalter unabdingbar, doch mit den Zeitaltern gehen auch die Weltanschauungen und heute sind die mechanischen Modelle Zeugen aus einer Zeit, als man noch dachte, die Natur wäre einfach und berechenbar aufgebaut.

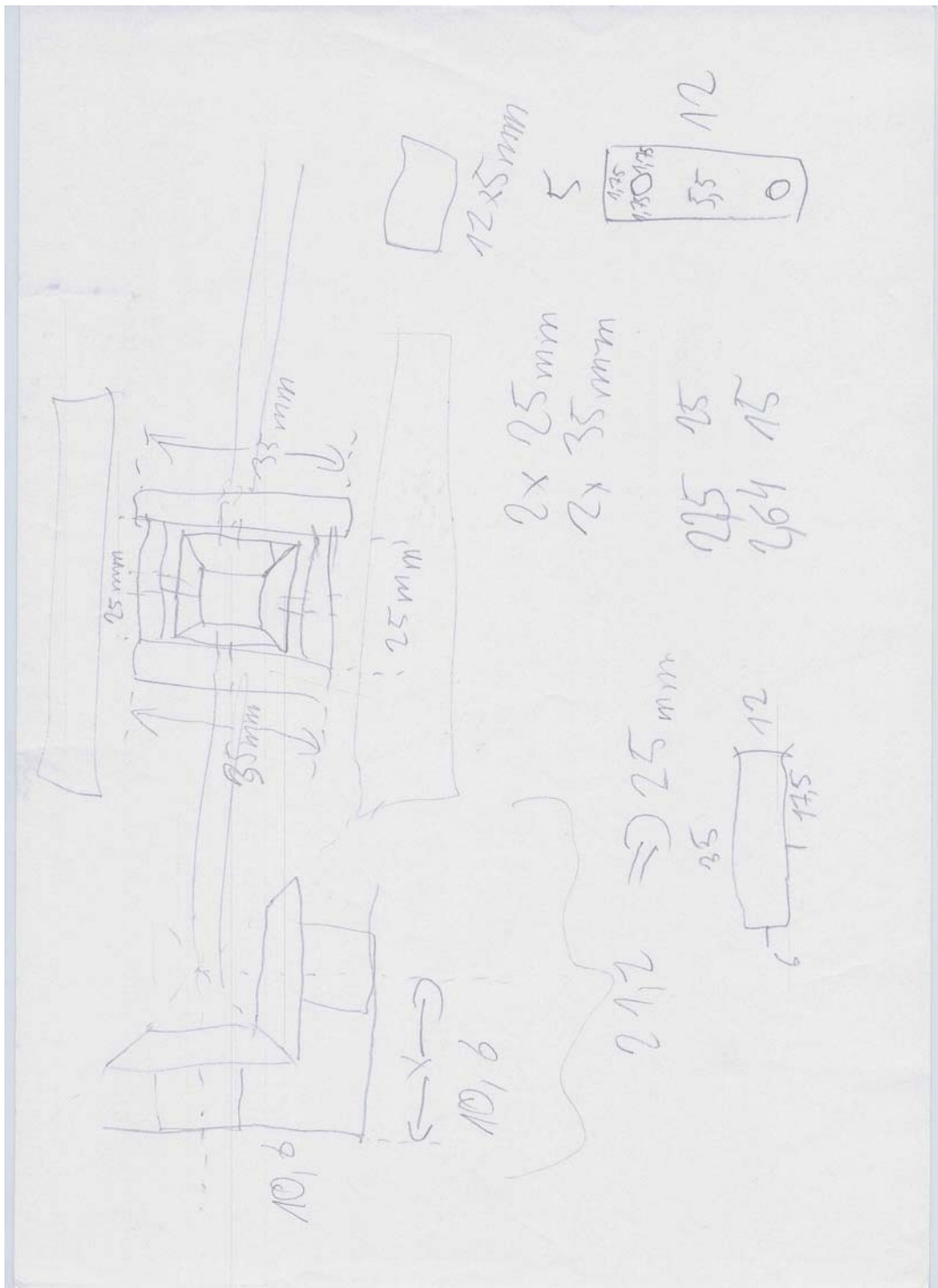
### Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Michael Faraday (8)	5
Abbildung 2	James Clerk Maxwell (8)	7
Abbildung 3	Faradays Induktionsring (2)	8
Abbildung 4	Maxwells Molekularwirbel (3)	10
Abbildung 5	Skizze des Induktionsmodells (7)	11
Abbildung 6	Kegelrad	12
Abbildung 7	Kegelrad	12
Abbildung 8	Rahmen	12
Abbildung 9	Langes Rahmenstück	13
Abbildung 10	Kurzes Rahmenstück	13
Abbildung 11	Verstiftung am Kegelrad	14
Abbildung 12	Langes Rahmenstück einbaufertig	14
Abbildung 13	Einblick in das Differential	16
Abbildung 14	Unterlegscheibe	16
Abbildung 15	Unterbau	16
Abbildung 16	Holzscheibe	17
Abbildung 17	Mitnehmerscheibe	17
Abbildung 18	Gießform von Gewichten	18
Abbildung 19	Gewicht	18
Abbildung 20	Fertiges Modell	19

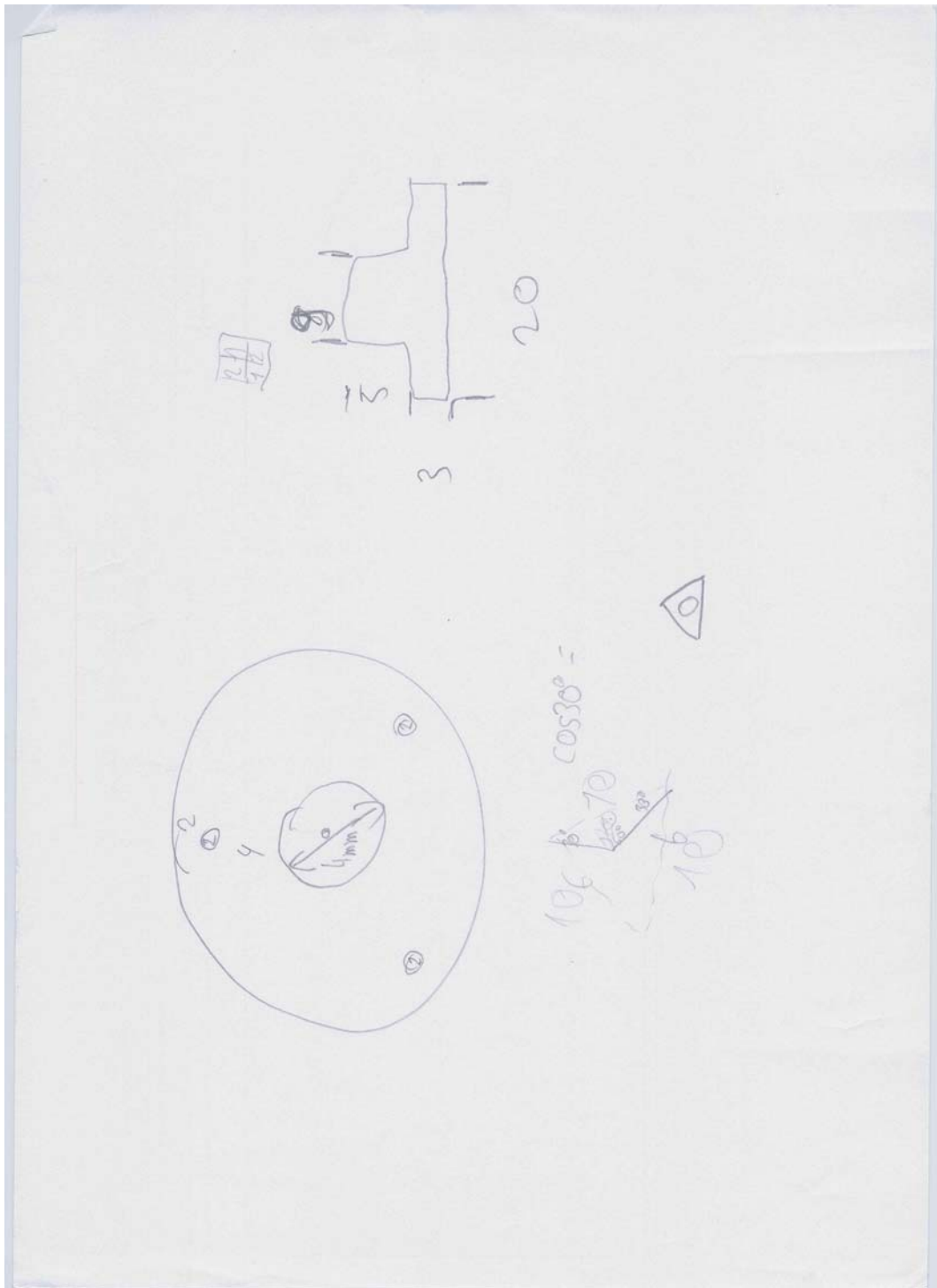
### Quellen

- (1) Jörg Meya: Elektrodynamik im 19. Jahrhundert, 1990, Seiten 176 bis 204
- (2) Stig Ekelöf: Catalogue of books and papers in electricity and magnetism, 1991, Seiten 274 bis 276
- (3) Fritz Frauenberger: Illustrierte Geschichte der Elektrizität, 1985, Seiten 543 bis 551
- (4) Karl von Meyenn: Die Großen Physiker I, 1997, Seiten 371 bis 383
- (5) Karl von Meyenn: Die Großen Physiker II, 1997, Seiten 7 bis 23
- (6) J. Teichmann, E. Ball, J. Wagnmüller: Einfache physikalische Versuche aus Geschichte und Gegenwart, 1999, Seiten 20 f.
- (7) <http://www.muellerscience.com/MODELL/Begriffsgeschichte/bicycle.jpg>
- (8) <http://commons.wikimedia.org>

Anhang



Konstruktionszeichnung zum Differential mit den einzelnen Baugruppen



Konstruktionszeichnung zur Mitnehmerscheibe

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

....., den.....  
Ort Datum Unterschrift des Schülers