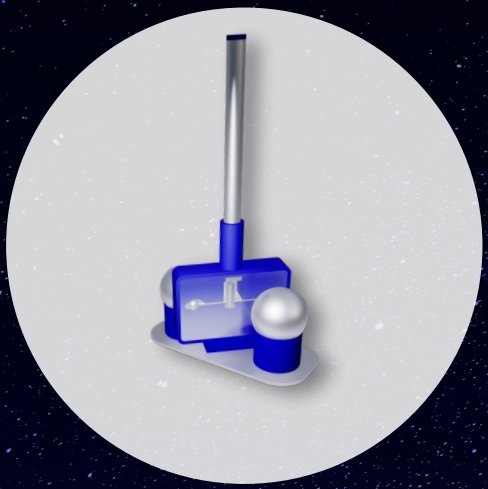
VOM WELTALL ZUR WERKSTATT:
ZWEI PROJEKTE, EINE AUFGABE

Chaos ist überall.
Gravitation verbindet.



Der Bau einer Gravitationsdrehwaage zur Ermittlung der Gravitationskonstanten.



Bau eines Werkzeugschranks mit Arbeitsplatte und elektrisch höhenverstellbarem Regal.



VORWORT

Wie lässt sich die Präzision des Handwerks mit der Logik der Programmierung und der Faszination für grundlegende Physik verbinden? Diese Frage bildet den roten Faden meiner Arbeit. Sie beginnt mit der Schaffung einer notwendigen Basis – dem Bau eines Werkzeugschranks, der Ordnung in die Werkstatt bringt. Dieses Projekt legte den Grundstein für eine tiefere Auseinandersetzung mit der Physik: den Bau einer Gravitationsdrehwaage. Hier treffen handwerkliche Herausforderungen auf physikalische Prinzipien und den Ehrgeiz, die Gravitationskonstante selbst zu bestimmen.

Der Werkzeugschrank war weit mehr als nur ein einfaches Möbelstück! Er forderte eine Kombination verschiedenster Schritte: von der sorgfältigen Auswahl und Bearbeitung des Holzes über die Planung und Umsetzung der elektronischen Komponenten für den motorisierten Hubkörper bis hin zur Programmierung des Arduino-Mikrocontrollers und der Fertigung spezifischer Halterungen und Einsätze mittels 3D-Druck. Jeder Schritt, von der ersten CAD-Skizze bis zur letzten Schraube, war wichtig, um ein gutes und schönes Ergebnis zu erhalten. Die Auswahl der Holzart war für dieses Projekt von besonderer Bedeutung.

Erst mit dieser neu geschaffenen Ordnung wurde der Raum frei für die Auseinandersetzung mit einem Thema, das mich seit jeher besonders fesselt: die Gravitation. Der Bau einer Gravitationsdrehwaage stellte eine wahre Herausforderung dar. An die Stelle robuster Holzverbindungen traten nun filigrane mechanische Aufbauten. Die Beschaffung exotischer Materialien wie des ultradünnen Beryllium-Kupfer-Torsionsdrahtes und der Umgang mit der extremen Empfindlichkeit der Apparatur gegenüber äußeren Einflüssen wie Vibrationen oder Luftströmungen prägten dieses Projekt. Es ging darum, eine Messanordnung zu konstruieren, die in der Lage ist, die winzige Anziehungskraft zwischen Massen nachzuweisen.

Das Ziel, die Gravitationskonstante G – *eine der fundamentalen Konstanten, die unser Universum beschreiben* – durch eigene Messungen zu bestimmen, war dabei mein Antrieb. Es ist mein Versuch, physikalische Theorie nicht nur zu verstehen, sondern sie praktisch anzuwenden und zu entdecken. Diese Arbeit zeichnet den Weg beider Projekte nach und zeigt auf, wie die Lösung eines praktischen Problems im Handwerk direkt in eine anspruchsvolle physikalische Untersuchung übergehen kann. Denn meine Voraussetzungen für die Auswahl des Projektes waren, etwas mit Holz, etwas mit Technik und etwas mit Naturwissenschaft zu erarbeiten. Es war überhaupt nicht einfach all das zu vereinen, aber es ist mir geglückt.

Lorenzo Bay-Müller,
Frankfurt, April 2025

DANKSAGUNG

Ein besonderer Dank gilt meinem Mentor, Gerhard Ohl, ein wahrer Meister. Seit ich 7 Jahre alt bin verbringe ich Freitag nachmittags bei ihm in der Schreinerei.

An meinem 8-Klassprojekt durfte ich auch selbstständig arbeiten. In der Schreinerei am Hof fühle ich mich zuhause. Am liebsten brainstorme ich mit Gerhard, wir lösen Kniffligkeiten und entwickeln neuen Entwürfe.

Einen besseren Meister und Mentor hätte ich mich nicht wünschen können!

Herzlichen Dank, Gerhard!

Mein Mentor:

Gerhard Ohl
Schreinerei Baugestaltung GmbH
Oberurseler Weg 19
D-60439 Frankfurt-Niederursel

INHALT

Vorwort 1

Danksagung 2

Projekt 1: Der werkzeugschrank 4

- Die Ideenfindung 4
- Die Planung 4
- Das Konzept 7
  - Erster Zuschnitt 9
  - Die Verleimung 11
  - Das Vorbereiten der Bretter 13
  - Zusammenbau 13
- Elektronik & Programmierung 16
  - Vorbereitung für die Schubladen 23
  - Bau der Schubladen 24
  - Die Arbeitsplatte 25
  - Bau des Hubkörpers 26
  - 3D-Druck und das Handwerk 27
  - Die Entstehung des 3D-Druckers 27
  - Der finale Zusammenbau! 30
  - Fazit 32

Projekt 2: Die Gravitationsdrehwaage 33

- Einleitung 33
- Die Planung 34
- Der Zusammenbau 36
- Die Messung 38
- Die Berechnung der Konstante 41
- Eine kurze Geschichte über Gravitation, die Erde und das Universum 47
- Learnings 51

Anhang Projekt 1: 52

- Zeit- und Kostenaufstellung 52

Anhang Projekt 2: 52

- Zeit- und Kostenaufstellung 52

PROJEKT 1:
DER WERKZEUGSCHRANK



PROJEKT 1: DER WERKZEUGSCHRANK

DIE IDEENFINDUNG

Die Idee zu meinem Projekt schwebt mir schon lange vor. Ich tüftele, bastele und werkele gerne und viel, entsprechend unordentlich sieht auch mein Zimmer aus. Überall Werkzeuge, Materialien und Elektroteile.

Die Idee, eine Gravitationsdrehwaage zu machen, habe ich ja auch. Doch in so einem Chaos ließ es sich nicht sehr gut arbeiten. Ich entschied mich etwas Nützliches, etwas Sinnvolles zu bauen, und da ich oft und gerne in der Schreinerei bin, wollte ich dem Chaos ein für alle Male ein Ende zu setzen. Einstein sagte einmal:

Nichts kann existieren ohne Ordnung.
Nichts kann entstehen ohne Chaos.

Dieses Problem „des Chaos“ musste ich wohl angehen, denn ich wollte später ja auch eine Gravitationsdrehwaage „entstehen“ lassen. So kam ich auf die Idee, einen Werkzeugschrank zu bauen. Die Idee entwickelte sich zu einem einfachen Rollschrank mit Schubladen. Es kamen Steckdosen, ein Licht und am Ende auch ein elektrisch hochfahrbares Regalelement im hinteren Bereich des Schrankes hinzu. Die Idee hierzu stammt von einem Projekt aus der siebten Klasse, wo wir etwas erfinden sollten. Hierbei kam meinen Freunden und mir die Idee, zur besseren Platzausnutzung im hinteren Bereich herausfahrbare Elemente zu platzieren.

DIE PLANUNG

Die Planung begann im August 2024. In diesem Monat sammelte ich meine Ideen. Als ich nach ein paar Wochen genug Ideen beisammen hatte, fing ich an, in einer CAD-Software[1] die 3D-Modelle zu modellieren. Das funktioniert, indem man erst im Programm eine 2D-Skizze mit Linien und Kurven zeichnet und dann die entstandenen Flächen „extrudiert“, das heißt in 3D umwandelt. Ich habe zwei bis drei Tage an den Maßen experimentiert, bis es die richtige Größe hatte. Nach einer Woche Herumprobieren hatte ich dann ein gutes Modell. Das Modell war zwar noch

[1] Computer Aided Design, zu Deutsch, Computer gestütztes Design

nicht final; ich habe im Laufe der Zeit immer wieder Dinge geändert, aber für die erste Planung hat es gereicht.

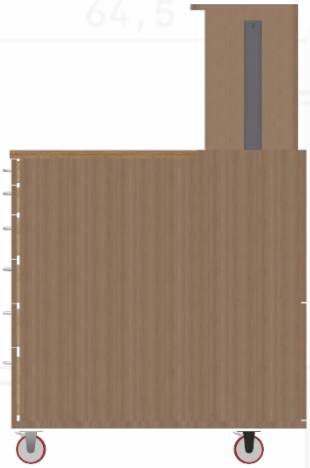
Da ich ein gutes 3D-Modell hatte, habe ich ein kleines Modell mit dem 3D-Drucker ausgedruckt, damit ich eine bessere Vorstellung der Proportionen bekommen konnte.

Einen Mentor zu finden war einfach, da ich schon seit vielen Jahren regelmäßig in einer Schreinerei arbeite. Ich hatte schon sehr guten Kontakt zu meinem Schreiner.

Im Anschluss setzte ich mich mit dem Schreinermeister zusammen, wir besprachen vor allem, wo wir das Holz herbekommen. Die Möglichkeiten waren entweder er bestellt 8 Quadratmeter fertige Buchenholzplatten bei einem Holzgroßhandel, oder ich verleime vor Ort vorrätige Buchenstämme selbst. Wir entschieden uns aus Kostengründen, und weil Verleimen ein spannender Prozess ist für letzteres.

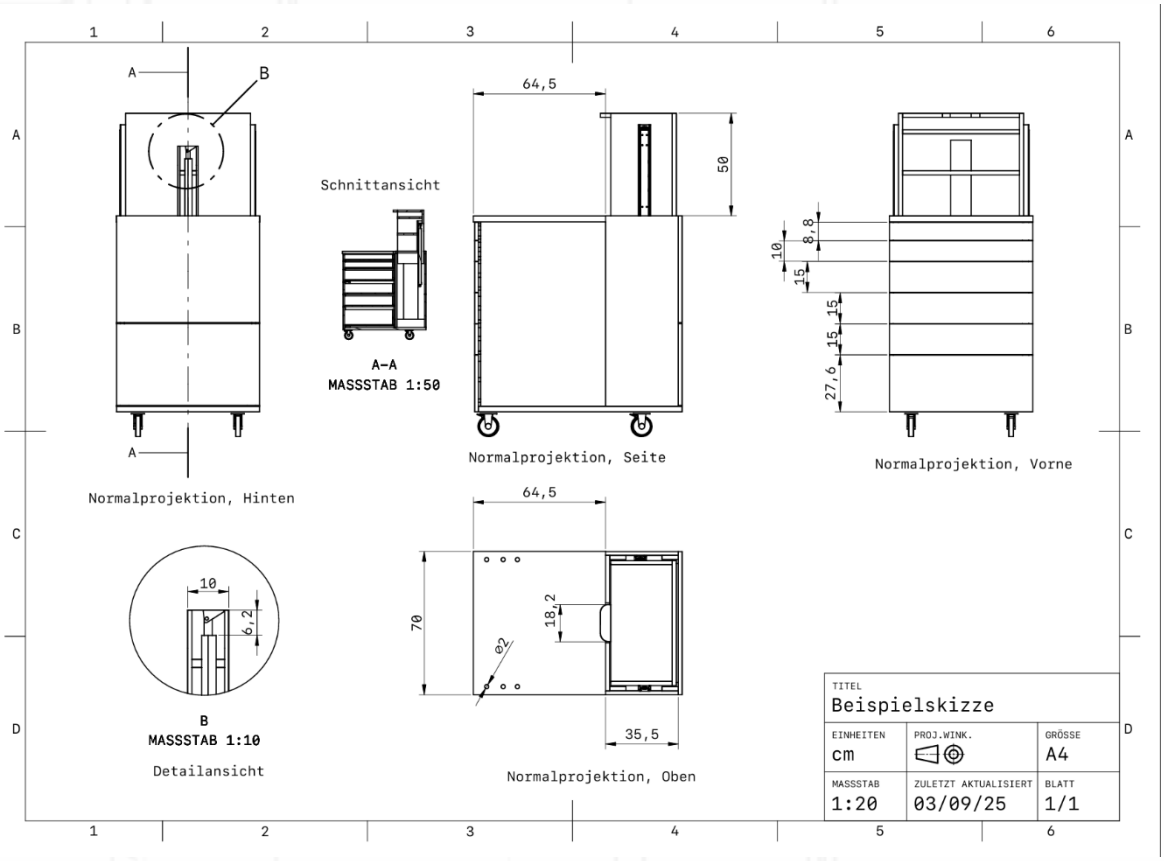
Also machte mir der Schreiner einen Kostenvoranschlag für das schon dort vorrätige Holz. Da Buche nicht das günstigste Holz ist, wir es aber wegen der Optik und Stabilität ausgewählt hatten, kam am Ende die Summe 275 € für die Stämme heraus.

Zurück zu meinem Modell. Mit einem 3D-Modell kann man nicht gut arbeiten, also generierte ich aus dem 3D-Modell 2D-Projektionszeichnungen. Aus diesen Skizzen erstellten wir dann Teile- und Zuschnittlisten.



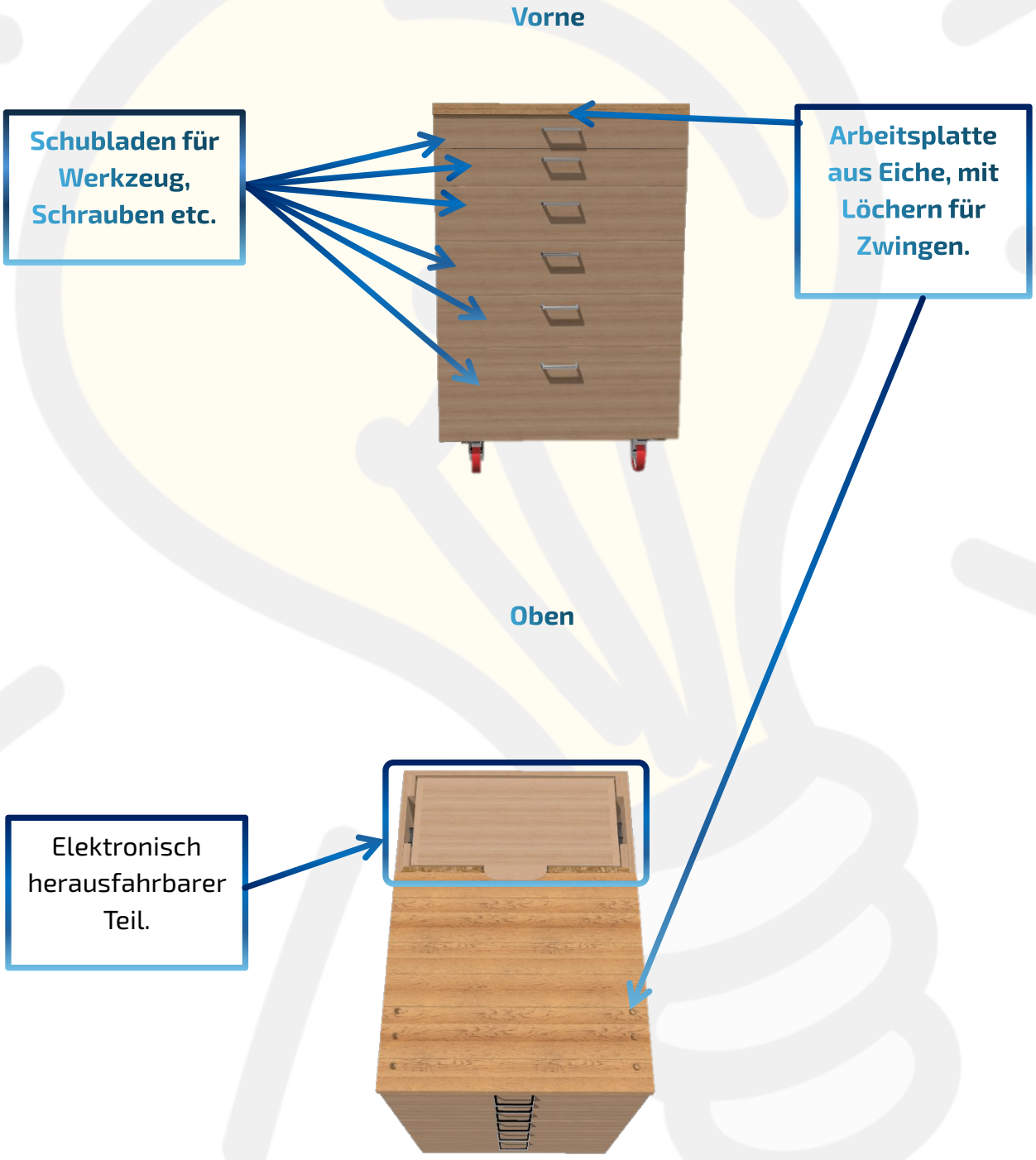
3D-Modell

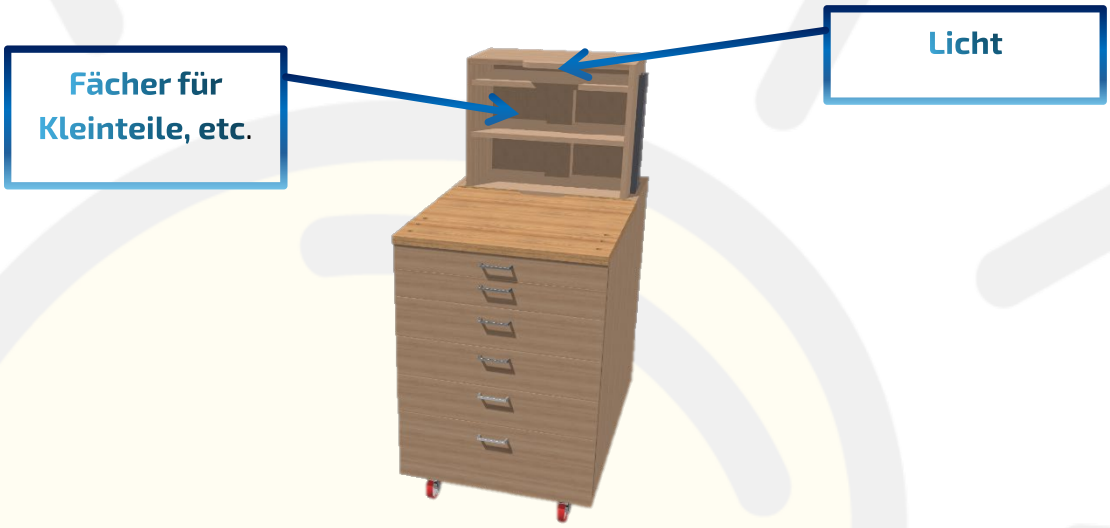
Konstruktionsskizze



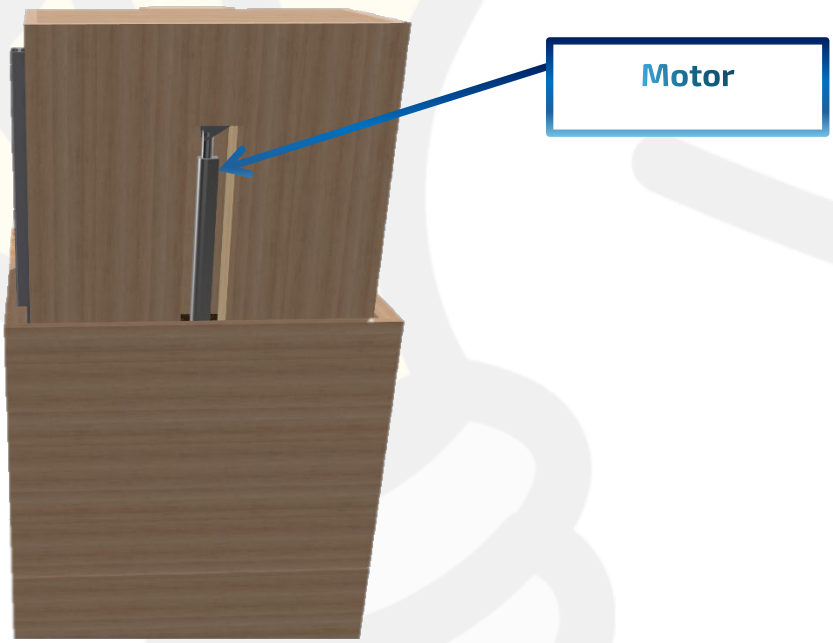
DAS KONZEPT

Gerne erkläre ich anhand meines Modells und anhand meiner Skizzen das Projekt etwas näher. Um das Ganze portabler und leichter zu machen, teilte ich den Schrank in zwei Korpi ein: den vorderen Teil mit Schubladen und den hinteren Teil mit dem elektrisch herausfahrbaren Teil. Beide werden am Ende auf der Bodenplatte fixiert. Für eine bessere Zugänglichkeit ist die Rückwand in zwei Teile geteilt, der untere lässt sich hochklappen.





Vorne mit Hub-Körper



Hinten

ERSTER ZUSCHNITT

Zuallererst haben wir die rohen 5 Meter langen Holzbohlen mit einer Kettensäge in ca. 2 Meter lange Stücke unterteilt.

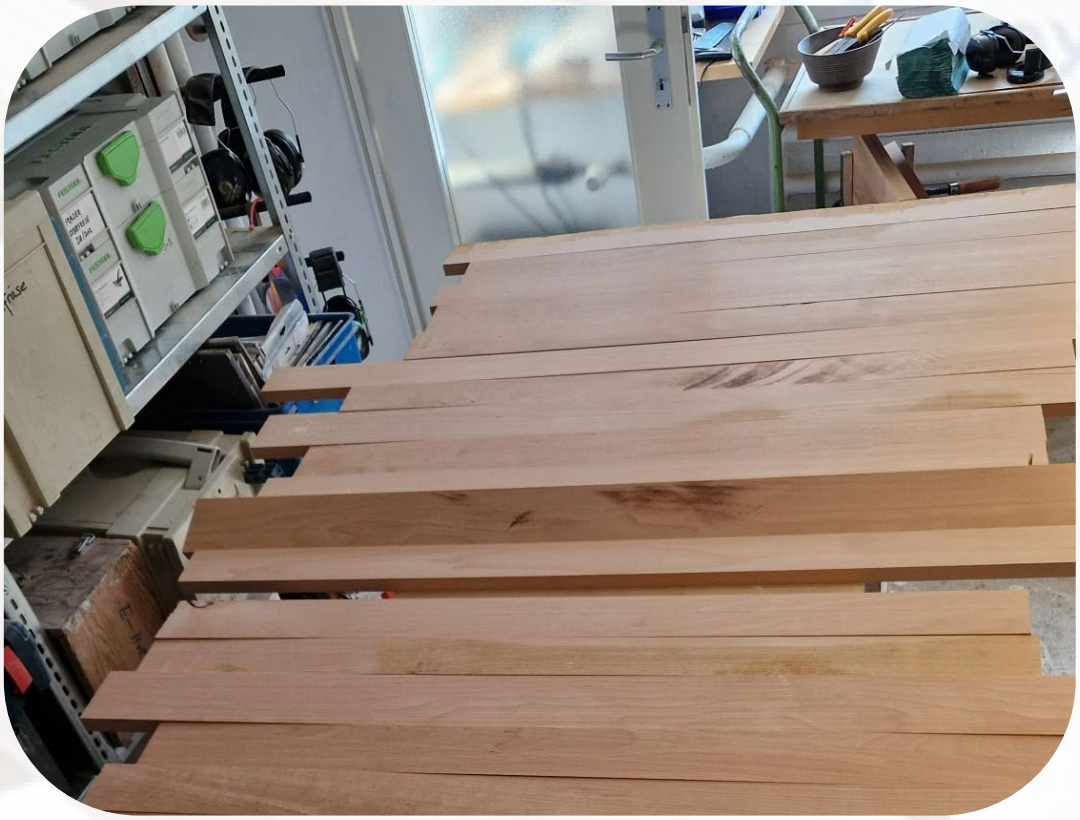


Die handlichen Holzbohlen waren jedoch immer noch extrem rau und gebogen, da in rohem Holz extrem viel Spannung gespeichert ist. Um diese Spannung loszuwerden, trocknet man das Holz mehrere Jahre, was bei mir schon geschehen ist. Danach schiebt man die Holzbohlen über die Abrichte[2], um das Holz bereit für den ersten Zuschnitt zu machen.

Jetzt werden die Holzbohlen mit der Tischkreissäge in 6 cm breite Streifen geschnitten. Diese Streifen wurden über die Abrichte geschoben und mit einer elektronischen Hobelmaschine[2] auf die richtige Stärke gehobelt. Stärke beschreibt in der Fachsprache die Dicke eines Holzstückes.

[2] Leicht anders als die Abrichte, bei dieser Maschine wir das Holz zwischen einer Auflagefläche und einer Messerwalze durchgezogen.

Die 2,0 Meter langen und 6 cm breiten Latten haben wir noch etwas gekürzt, auf ca. 1,4 Meter. Zu diesem Zeitpunkt hatten wir ca. 35 Latten.



DIE VERLEIMUNG

Um aus den vielen einzelnen Latten ein stabiles Brett herzustellen, mussten diese Seite an Seite verleimt werden. Dabei wurden die Latten nicht einfach wahllos zusammengeklebt, sondern mit einer speziellen Technik angeordnet. Der Grund dafür liegt in der natürlichen Spannung, die im Holz durch den Trocknungsprozess entstanden ist.

Holz neigt dazu, sich zu verziehen oder zu wölben, wenn diese inneren Spannungen ungleichmäßig verteilt sind. Würde man die Latten ohne ein bestimmtes Muster verleimen, wäre das fertige Brett krumm oder uneben geworden.

Zu Beachten:

Nach folgender Regel mussten Bretter oder Latten verleimt werden:

1. Man schaut an den Stirnseiten[3] des Holzes und markiert, wo die zur ursprünglichen Stammmitte am nächsten gelegene Stelle ist.
2. Man legt die Latten so hin, dass die zuvor gemachte Markierung abwechselnd nach oben oder unten zeigt.
3. Die Hölzer werden abwechselnd horizontal um 180° gedreht, sodass die Markierungen abwechselnd in folgender Reihenfolge liegen:

   Links (Außen) – Rechts – Links – Rechts – Links - Rechts (Außen)



Das Verleimen an sich war relativ unkompliziert. Als alle Latten in der richtigen Reihenfolge angeordnet waren, mussten wir die sich berührenden Seiten sorgfältig

[3] Die Stirnseite vom Holz ist die Schnittfläche, die quer zur Faserrichtung verläuft und die Jahresringe sichtbar macht.

mit Holzleim bestreichen. Dabei ist es sehr wichtig, den Leim gleichmäßig aufzutragen, damit die Verleimung stabil und dauerhaft wird.

Sobald der Leim aufgetragen war, musste zügig gearbeitet werden, weil der Leim bereits nach kurzer Zeit anfängt zu trocknen. Die Latten werden als nächsten Schritt eng aneinandergefügt und mit Zwingen fest zusammengedrückt. Dieser Druck ist wichtig, um überschüssigen Leim herauszupressen und sicherzustellen, dass keine Lücken zwischen den Latten entstehen.

Die entstandenen verleimten Bretter mussten zwei Stunden unter Spannung trocknen, damit der Leim vollständig aushärten konnte. Während dieser Zeit durften die Zwingen nicht gelöst werden. Erst nach der vollständigen Trocknung konnten die Bretter weiterbearbeitet werden.



DAS VORBEREITEN DER BRETTER

Die frisch verleimten Bretter waren zwar gut miteinander verbunden, doch die Oberfläche war noch äußerst uneben und rau. Um eine glatte und gleichmäßige Struktur zu erreichen, mussten die Bretter erneut durch die Hobelmaschine geführt werden. Dieser Schritt sorgte dafür, dass Unebenheiten entfernt und alle Bretter auf eine einheitliche Stärke[4] gebracht wurden.

Anschließend ging es an das Zuschneiden: Mithilfe der Kreissäge haben wir die Bretter auf die gewünschten Maße zugeschnitten. In der anschließenden Nachbearbeitung widmeten wir uns den Details — sehr wichtig, damit am Ende alles gut aussieht. Wir schliffen die Oberflächen sorgfältig, um eine glatte Oberfläche zu erzielen, füllten kleinere Löcher und Risse mit Holzpaste auf und sorgten dafür, dass diese Stellen nach dem Trocknen nahtlos in die Oberfläche passten.

Zum Abschluss wurden die Kanten mit einer Oberfräse[5] sanft abgerundet, um zu verhindern, dass man sich an der Kante verletzt. Erst nach diesen Schritten wirkten die Bretter nicht nur hochwertig, sondern waren auch bereit für den weiteren Zusammenbau.

ZUSAMMENBAU

Jetzt ging es darum, mit welcher Technik wir die Bretter verbinden. Dafür gibt es verschiedene Methoden:

[4] Schreinersprache: Dicke vom Holz

[5] Eine Oberfräse ist ein Werkzeug, mit dem man mit einem Fräskopf von oben das Holz anfräsen kann, zum Beispiel um Kanten abzurunden oder Rillen einzufräsen.

Methode	Beschreibung	Contra	Bild
Lamellos	Flache Holzplättchen (Lamellos) werden in Nuten[6] gesetzt und verleimt.	- Benötigt spezielles Werkzeug	
Domino	Ähnlich wie Dübel, aber mit ovalen, größeren Verbindern.	- Teures Spezialwerkzeug	
Dübel	Runde Holzdübel werden in gebohrte Löcher eingesetzt und verleimt.	- Erfordert genaue Ausrichtung	
Fingerzinken	Verzahnte Verbindungen mit abwechselnden Zinken und Lücken.	- Aufwändige Herstellung mit hoher Präzision	
Schwalben-schwanz	Dreiecksförmige Zinken, die sich gegenseitig verkeilen.	- Sehr zeitaufwändig und erfordert hohe Präzision.	
Verleimung auf Stoß	Platten werden flach aufeinander geleimt.	- Geringe Stabilität ohne zusätzliche Dübel	
Schrauben	Platten werden mit Schrauben verbunden.	- Sichtbare Schraubenköpfe	

[6] Dünner, gefräster Schlitz im Holz

Wir haben uns für die Lamelloverbindung entschieden. Bevor wir loslegen konnten, mussten wir uns erst mal genau anschauen, welche Kanten der Werkstücke später aufeinandertreffen sollen. Diese Kanten haben wir dann mit einer speziellen Lamellofräse kleine Nuten gefräst – welche etwa 4 cm lang waren. Das Schwierigste dabei war, dass die Nuten wirklich exakt übereinander liegen mussten, sonst hätte die Verbindung später nicht richtig gepasst. Nachdem wir alle Nuten gefräst hatten, konnten wir die Lamelloplättchen einsetzen. Die haben wir mit Holzleim fixiert, damit die Verbindung auch dauerhaft hält. Im Anschluss habe ich aus einer großen Fichtenplatte die Grundplatte ausgesägt und die vier Räder montiert.

Mit diesem Schritt war der Grundkorpus fertig!

Stand der Arbeiten:



Da der hintere Teil elektronisch herausfahrbar sein sollte, brauchte ich einen Motor. Als Mechanismus hatte ich an verschiedene Varianten gedacht: einen normalen kleinen Elektromotor mit Riemen oder Kette, einen kleinen Elektromotor mit einem Flaschenzug oder, wie ich nach einiger Recherche fand, einen Linearaktuator. Der Vorteil des Linearaktuators war, dass dieser ziemlich stark, aber trotzdem schlank ist. Doch ein Motor allein reichte nicht. Damit dieser sich bewegen kann, brauchte ich auch ein Netzteil. Der Motor könnte jetzt zwar hoch oder runterfahren, die Richtungsänderung würde aber nur durch manuelles Wechseln der Drähte geschehen. Da ich aber ja noch ein Licht einbauen und alles fernsteuerbar machen wollte, habe ich mir etwas Besseres einfallen lassen. Für die Richtungsänderung des Motors habe ich als Lösung ein sogenanntes Motordriverboard ausgewählt. Es besteht aus zwei Anschlüssen für + und – des Motors, zwei Anschlüsse für + und – des Netzteils sowie drei Steueranschlüsse. Das Motordriverboard funktioniert mithilfe eines kleinen Chips, der je nach Steuersignal die Polarität der Anschlüsse tauscht. Für das Licht habe ich mir zwei extrem leistungsstarke LED-Panels besorgt, die an ein Relais[7] angeschlossen sind.

Jetzt braucht das Ganze nur noch sein „Gehirn“, als Mikrochip habe ich mich für einen Arduino R3 entschieden. Er ist klein und hat genügend digital (für die Motorrichtungssteuerung), analog (für das Licht, An / Aus) und PWM[8] (für die Geschwindigkeitssteuerung des Motors) Anschlüsse.

Um das ganze fernsteuerbar zu machen, brauchte ich noch eine Fernbedienung mit Empfänger. Zuerst verwendete ich eine IR-Fernbedienung[9] mit einem IR-Empfänger, aber da ich den Empfänger hinten in meinem Werkzeugschrank haben wollte und IR direkten Sichtkontakt benötigt, entschied ich mich am Ende doch für eine 433 Mhz-Fernbedienung mit entsprechendem Empfänger. Dieser arbeitet mit Radiowellen statt mit Licht und kann auch durch Objekte hindurch funktionieren.

Endlich ging es ans Programmieren. Einen Arduino programmiert man mit C++, meine zweitliebste Programmiersprache nach Python. Programmiert wird in der Arduino IDE, ein Programm, um Code zu schreiben und in für den Computer lesbare Sprache umzuwandeln. Beim Programmieren ist vor allem die Syntax wichtig, das heißt, wie die Befehle angeordnet sind. So kann zum Beispiel ein Leerzeichen an der falschen Stelle zu einem Fehler führen.

[7] Ein Relais ist eine Art Schalter der mithilfe von Elektromagneten bewegt wird, es hat zwei Aus- und Eingänge sowie zwei Steueranschlüsse.
[8] PWM steuert die Motordrehzahl, indem es den Strom schnell ein- und ausschaltet; längere "Ein"-Phasen bedeuten höhere Drehzahl.
[9] IR = Infrarot, wie eine Fernseherfernbedienung.

Beim Programmieren ist wichtig, sich erst einmal zu überlegen, wie die Struktur des Programms aussehen soll. Am bestem erstellt man sich eine Tabelle. In diese schreibt man rein, welche Funktionen das Programm aufrufen oder ausführen soll. Daraus kann man später ein Modul erstellen, um den Code übersichtlicher zu machen.

Im Übrigen, sollte man noch reinschreiben, welche Logiken, also „*If … then …* „ man verwendet (diese kommen ins Hauptprogramm) und welche Datenverarbeitung/Gewinnung man hat.

Meine Tabelle:

Funktion:	Beschreibung
Motor hoch	Funktion, die den Motor hochfahren lässt, bis dieser oben ist (Zeitbeschränkung, 35 Sec).
Motor runter	Funktion, die den Motor herunterfahren lässt, bis dieser unten ist (Zeitbeschränkung, 40 Sec).
Licht an	Funktion, die das Licht anmacht.
Licht aus	Funktion, die das Licht ausmacht.
Motor Stopp	Funktion, die den Motor anhält.
Inputs/ Datenquellen	
433 MHz Empfänger	Empfänger
***If* Logik**	
Signal empfangen	Wenn Signal empfangen, Signal decodieren und speichern.
Signal interpretieren	Signal interpretieren und Funktion aufrufen.

Es geht los!

Zuerst habe ich die Funktionen erstellt, in C++ heißen diese: *example.h*
Die Bibliotheken müssen dann nur noch in das Hauptprogramm importiert werden:

```
#include <RCSwitch.h>
#include "motorUp.h"
#include "motorDown.h"
#include "ledOn.h
#include "ledOff.h"
#include "motorStop.h"
```

Jetzt folgt das Hauptprogramm:

Die angeschlossenen Geräte an den Pins[10] und die Bibliotheken müssen am Anfang des Codes initialisiert werden:

```
// Pin-Definitionen
int motorPin1 = 7;
int motorPin2 = 8;
int ledPin = 4;
int RECV_PIN = 1;  // Pin für den RC-Empfänger

RCSwitch mySwitch = RCSwitch(); // Initialisierung des RC-Switch-Objekts
```

Nun folgt die erste Logik, die auf Eingaben der Fernbedienung wartet. *If* wartet auf Daten, diese werden dann entschlüsselt und der erhaltene Code wird dann in einer Variable gespeichert.

```
void loop() {
  if (mySwitch.available()) {  // Wenn Daten empfangen wurden
    unsigned long receivedCode = mySwitch.getReceivedValue();  // Empfangenen
Code holen
    if (receivedCode != 0) {
      Serial.print("Empfangener RC Code: ");
      Serial.println(receivedCode);  // Ausgabe des empfangenen Codes in Hex
      handleRCInput(receivedCode);  // Funktion zur Verarbeitung des Codes
aufrufen.
    }
    mySwitch.resetAvailable();  // Bereit für den nächsten Code
  }
}
```

[10] Den Anschlüssen des Arduinos.

Da der Arduino noch nicht weiß, was die Codes bedeuten, müssen wir den Codes Namen zuweisen:

```
void handleRCInput(unsigned long code) {

  const unsigned long MOTOR_DOWN_CODE1 = 895875795;
  const unsigned long MOTOR_DOWN_CODE2 = 1203400083;
  const unsigned long MOTOR_UP_CODE1 = 1736272083;
  const unsigned long MOTOR_UP_CODE2 = -1255630701;
  const unsigned long LED_OFF_CODE = -1307640619;
  const unsigned long LED_OFF_CODE2 = -607680619;
  const unsigned long LED_ON_CODE = -597166379;
  const unsigned long LED_ON_CODE2 = -1183617131;
  const unsigned long MOTOR_STOP_CODE = 1616357851;
  const unsigned long MOTOR_STOP_CODE2 = 222034331;
```

Die Logik zum Entscheiden, welche Funktion aufgerufen werden muss, sieht so aus:

```
Serial.print("Empfangener Code: ");
  Serial.println(code, HEX);

  // Hier wird der empfangene RC-Code mit den vordefinierten Codes verglichen
und die passende Funktion aufgerufen
  if (code == MOTOR_UP_CODE1 || code == MOTOR_UP_CODE2) {
    motorUp(motorPin1, motorPin2);  // Funktion aus Sub-Sketch 'MotorUp'
aufrufen.
  } else if (code == MOTOR_DOWN_CODE1 || code == MOTOR_DOWN_CODE2) {
    motorDown(motorPin1, motorPin2);  // Funktion aus Sub-Sketch 'MotorDown'
aufrufen.
  } else if (code == LED_ON_CODE || code == LED_ON_CODE2) {
    ledOn(ledPin);  // Funktion aus Sub-Sketch 'LEDOn' aufrufen.
  } else if (code == LED_OFF_CODE || code == LED_OFF_CODE2) {
    ledOff(ledPin);  // Funktion aus Sub-Sketch 'LEDOff' aufrufen.
  } else if (code == MOTOR_STOP_CODE || code == MOTOR_STOP_CODE2) {
    motorStop(motorPin1, motorPin2);  // Funktion aus Sub-Sketch 'MotorStop'
aufrufen.
  }
}
```

Das Programm prüft, mit welchen Codes die empfangenen Codes übereinstimmen, und ruft die entsprechende Funktion auf.

Die Funktionen sehen dann so aus:

LedOff.h

```
#ifndef LEDOFF_H
#define LEDOFF_H


void ledOffSetup(int ledPin) {
    pinMode(ledPin, OUTPUT);  // Beispiel Pin für LED
}

void ledOff(int ledPin) {
    Serial.println("LED ist aus");
    digitalWrite(ledPin, LOW);  // LED einschalten
}

#endif
```

Erst muss der Modus der Pins festgelegt werden, ob Input oder Output, dann wird ein Zustand zu diesem Pin geschrieben, in diesem Fall LOW, das heißt kein Strom am LedPin, der mit dem Relais verbunden ist. LedOn.h lasse ich hier weg, ist aber genauso aufgebaut.

MotorDown.h

```
#ifndef MOTORDOWN_H
#define MOTORDOWN_H

... initialisieren...

void motorDown(int motorPin1, int motorPin2) {
    Serial.println("Motor fährt hoch");
    digitalWrite(motorPin1, LOW);
    digitalWrite(motorPin2, HIGH);
    // Beispielhafte Ansteuerung des Motors
    // Füge hier den Code ein, der den Motor hochfahren lässt
}

const unsigned long interval2 = 35000; // wartezeit
unsigned long previousMillis2 = 0; // Speichert die letzte Zeit, zu der die
Aktion ausgeführt wurde

void setupStopppp(int motorPin1, int motorPin2) {
    Serial.begin(9600); // Serielle Kommunikation starten
    pinMode(motorPin1, OUTPUT); // Setze motorPin1 als Ausgang
```

```
    pinMode(motorPin2, OUTPUT); // Setze motorPin2 als Ausgang
}

void executeActionnn(int motorPin1, int motorPin2) {
    digitalWrite(motorPin1, LOW); // Motor anhalten (Low signal)
    digitalWrite(motorPin2, LOW);  // Motor anhalten (Low signal)
}

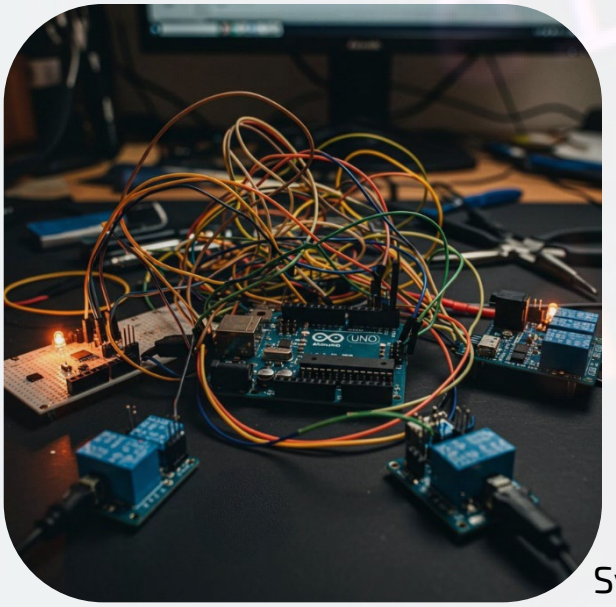
void looppp(int motorPin1, int motorPin2) {
    unsigned long currentMillis = millis(); // Aktuelle Zeit abrufen

    // Überprüfen, ob 35 Sekunden vergangen sind
    if (currentMillis - previousMillis2 >= interval2) {
        previousMillis2 = currentMillis; // Zeit aktualisieren
        executeAction(motorPin1, motorPin2); // Aktion ausführen
    }


}
#endif
```

Die Motorsteuerungen waren etwas kompliziert. Ich wollte unbedingt noch den Stopp Befehl haben. Der Arduino nimmt aber keine Befehle entgegen, wenn Delay[11] verwendet wird. Also musste ich einen anderen Weg finden, die Wartezeit zu messen, ohne zu blockieren.

Das Programm hat an diesem Punkt zwar funktioniert, das Ganze sah halt so aus:



Symbolbild

[11] Eine Wartezeit zur nächsten Aktion.

Also machte ich mich daran, ein PCB[12] zu designen. Genauer gesagt habe ich zwei verschiedene Platinen designt. Eine, die entsprechende Stecker hat, um auf den Arduino gesteckt zu werden. Die andere, um auf diese Platine gesteckt zu werden, an welcher dann der Motordriver sowie die Relais und Empfänger befestigt werden.

Das Designen geht in einer bestimmten Software vonstatten. Dort kann man die Verbindungen, die man haben möchte, „malen". Nach dem Designprozess habe ich die Datei an eine Firma geschickt, die mir die Platinen produziert hat. Platinen werden mithilfe des Ätzens von Metallschichten hergestellt.

Nachdem die PCBs angekommen sind, habe ich die Bauteile aufgelötet, die Kabel angelötet und alles verbunden und zusammengesteckt. Als Abschluss musste ich nur noch meinen Code mit einem Kabel auf den Arduino flashen[13].

Fertig!

Nach ein paar Stunden Debuggen und Fehlerbeseitigen funktionierte alles wie Butter!

[12] Printed Circuit Board, eine Platine.

[13] "Flashen" bezeichnet den Vorgang, einen Programmcode oder eine Firmware auf einen Mikrocontroller oder ein anderes elektronisches Gerät zu übertragen und dort dauerhaft zu speichern, damit es die gewünschten Funktionen ausführen kann.

VORBEREITUNG FÜR DIE SCHUBLADEN

Nun ging es an den Bau der Schubladen. Zuallererst war die Frage, wie wir die Schubladen befestigen. Normalerweise würde man Metall Schubladenlagerschienenauszüge[14], wie man sie von Schränken kennt, verwenden. Diese haben mehrere ineinandergeschobene Schienen, die auf Kugellagern laufen und für einen geschmeidigen Lauf sorgen, aber sie sind extrem teuer. Da ich 6 Schubladen wollte, hätte ich 12 Schienen gebraucht, die zusammen ca. 600 € gekostet hätten!

Die Alternative, für die wir uns dann auch entschieden, war in die Seiten der Schubladen jeweils eine Nut[15], 0,7 cm tief und 1 cm breit, zu fräsen und dann an die Seitenwände des Schrankes Holzleisten zu schrauben. Diese müssen gut geschliffen und eingefettet werden, damit alles gut „flutscht". Also sägten wir der Stabilität halber erst 12 größere Leisten/Latten, die wir jeweils mit 3 Spax[16] Schrauben innen an die Außenwände geschraubt. An diese haben wir danach die kleineren Leisten geschraubt. Die kleinen waren ein klein wenig kleiner als die Nuten. Beim Verschrauben dieser kleinen Leisten mussten wir extrem aufpassen, dass sie gerade und rechtwinklig angebracht werden, ansonsten würden sich die Schubladen später verklemmen.



Jetzt kann es mit dem eigentlichen Schubladenbau losgehen.

[14] Ja, die heißen wirklich so.
[15] Eine gefräste rille.
[16] Meiner Meinung nach beste Schrauben.

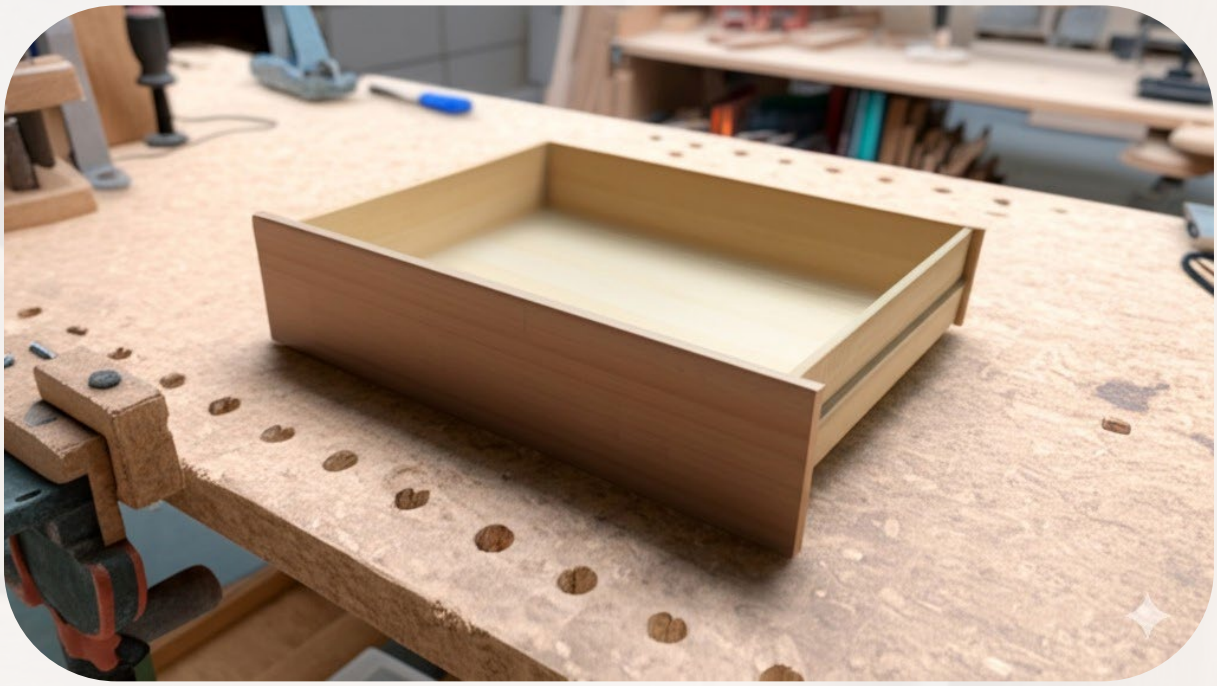
BAU DER SCHUBLADEN

Für die Schubladen hatte ich mir im Baumarkt mehrere Latten in der exakt richtigen Breite für die Schubladenseiten und die Rückwand besorgt, sowie zwei große Platten, aus denen ich die 600x600[17] großen Bodenplatten herausschneiden konnte.

Nach dem Zuschnitt bauten wir die Schubladen mit Hilfe der Lamelloverbindungen zusammen. Für die Frontplatten (Blenden) der Schubladen verleimte ich wieder einige Platten selbst.

Diese Blenden verbanden wir mithilfe von Dübeln mit dem Rest der Schubladen. Damit die Blenden richtig halten und gerade werden und die Dübel passen, benutzen wir sogenannte Dübelüberträger, kleine Metallnippel mit einem Dorn, die man in die Löcher auf der einen Seite steckt und dann die andere Seite mit einem Hammer dagegen klopft, übertragen sich die Position der Löscher.

Nach dem Zusammenbau waren die Schubladen fertig!



[17] Schreiner bauen und messen alles in Millimetern.

DIE ARBEITSPLATTE

Obwohl die Schubladen endlich eingebaut waren, fehlte dem vorderen Korpus noch eine entscheidende Komponente: die Arbeitsplatte. Eine passende Platte zu finden, erwies sich als größere Herausforderung als erwartet. Im Baumarkt waren die angebotenen Platten entweder viel zu groß oder knapp zu klein. Nach einigen vergeblichen Versuchen entschieden wir uns schließlich für den Besuch im Holzfachhandel. Dort wurden wir fündig und wählten eine passende Eichenplatte.

Eiche gilt als eines der teuersten Hölzer in Deutschland, doch ihre Stabilität und Widerstandsfähigkeit machen sie zum idealen Material für Arbeitsplatten. Sie kann großer Belastung standhalten. Außerdem ist Eiche mein Lieblingsholz.

Der erste Schritt bestand darin, das Holz vorzubereiten. Wir richteten die Platte ab, hobelten sie, um eine gleichmäßige Dicke zu erzielen, und schnitten sie anschließend auf das genaue Maß zu. Nach dem Zuschnitt folgte ein intensives Schleifen, beginnend mit grobem Schleifpapier, um Unebenheiten zu beseitigen, und endend mit feinerem Schleifpapier, um eine glatte und angenehme Oberfläche zu schaffen.

Im nächsten Schritt fräste ich Lamellonuten in die Unterseite der Arbeitsplatte sowie in die Oberkanten der Seitenwände. Hierbei war es entscheidend, die Positionen der Nuten genau abzumessen, um eine perfekte Passform zu gewährleisten.

Im hinteren Bereich frästen wir mit einer CNC-Fräse eine Aussparung für die LED-Streifen. Die computergesteuerte Fräse ermöglichte es uns, millimetergenau zu arbeiten und ein sauberes Ergebnis zu erzielen.

Zusätzlich bohrten wir sechs Löcher mit einem Durchmesser von 3 cm für Zwingen.

Bevor sie jedoch montiert wurde, erhielt die Eichenplatte noch eine abschließende Behandlung mit Hartholzöl auf Basis von Leinöl. Dieses natürliche Öl dringt tief in das Holz ein, schützte es vor Feuchtigkeit und unterstreicht zugleich die schöne Maserung der Eiche. Das Ergebnis war eine warme, matte Optik mit einer angenehm glatten Haptik.

Nach der Montage saß die Arbeitsplatte perfekt auf dem Korpus.

BAU DES HUBKÖRPERS

Nach ein paar Korrekturen meines Bauplans ging ich zum Baumarkt und besorgte mir wieder passendes Holz. Nachdem ich die besten Stücke gefunden hatte, ließ ich einige grob zuschneiden, um den Transport zu erleichtern.

Zu Hause angekommen, begann ich mit dem exakten Zuschnitt. Hierbei nutzte ich die Tischkreissäge, um alle Latten millimetergenau auf die benötigte Länge und Breite zu bringen. Zwischendurch kontrollierte ich immer wieder mit einem Winkel, um sicherzustellen, dass alle Kanten perfekt rechtwinklig sind. Ein sauberer Zuschnitt ist entscheidend für das Endergebnis, daher nahm ich mir hier extra viel Zeit.

Nachdem alle Latten zugeschnitten waren, sortierte ich sie anhand ihrer Optik, um die schönsten Stücke für die sichtbaren Flächen zu reservieren. Anschließend begann ich mit dem Zusammenfügen der einzelnen Teile. Hierfür entschied ich mich für Lamello-Verbindungen in Kombination mit Holzleim.

Um das Ganze beim Leimen zu fixieren, verwendete ich mehrere Zwingen, die ich so platzierte, dass der Druck gleichmäßig verteilt wurde. Während der Leim trocknete, kontrollierte ich mehrfach, ob alles im rechten Winkel blieb und ob kein Leim an den Seiten austritt.

Während der Trocknungszeit bereitete ich bereits den nächsten Arbeitsschritt vor: das Abschleifen der Oberflächen. Hierfür wählte ich zunächst grobes Schleifpapier, um Unebenheiten und Leimreste zu entfernen. Danach folgte ein Feinschliff mit immer höherer Kornzahl, bis die Oberfläche glatt und angenehm zu berühren war.

Jetzt folgt etwas zum Nachdenken. Wie verbinden wir Handwerk mit modernen Technologien? Hier habe ich mich wieder gefunden und ausgetobt! Ein Infoartikel für die Neugierigen folgt – viel Spaß beim Lesen!



3D-DRUCK UND DAS HANDWERK

Hast du jemals darüber nachgedacht, einen Stuhl, einen Tisch oder ein ganzes Haus gedruckt zu bekommen? Oder auf einem gemütlichen 3D-gedruckten Sessel zu entspannen? Der 3D-Druck kann große Chancen eröffnen und Großes leisten.

DIE ENTSTEHUNG DES 3D-DRUCKERS

Der 3D-Druck, auch als additive Fertigung bekannt, hat sich in den letzten Jahrzehnten zu einer revolutionären Technologie entwickelt. Heute findet er Anwendung in zahlreichen Branchen, von der Medizin über die Luftfahrt bis hin zur Architektur. Doch die Ursprünge dieser Technologie reichen weit zurück und sind das Ergebnis jahrelanger Forschung und technischer Entwicklungen. Dieser Text beleuchtet die Geschichte des 3D-Drucks von den ersten Ideen bis hin zur modernen Anwendung.

Die Idee, dreidimensionale Objekte durch schichtweises Auftragen von Material zu erzeugen, hat ihren Beginn in den 1970er-Jahren. Bereits in damals experimentierten Wissenschaftler mit verschiedenen Methoden zur additiven Fertigung. Einer der frühesten Ansätze war die sogenannte „Fotopolymerisation“, bei der lichtempfindliche Harze (eine Art flüssiger Kunststoff) durch UV-Licht ausgehärtet wurden. Doch erst in den 1980er-Jahren nahm die Entwicklung des modernen 3D-Drucks so richtig Fahrt auf.

Die erste bedeutende Entwicklung im Bereich des 3D-Drucks war das von Dr. Hideo Kodama aus Japan 1981 eingereichte Patent für ein „Rapid Prototyping“-System. Hideo Kodama entwickelte ein Verfahren, bei dem diese UV-gehärteten Harze schichtweise aufgetragen wurden. Obwohl sein Patent nie von Firmen genutzt wurde, legte es den Grundstein für spätere Entwicklungen.

Ein weiterer Meilenstein war das 1984 von Charles W. Hull entwickelte Stereolithografie-Verfahren (SLA). Dieses Verfahren funktioniert folgendermaßen: Ein Behälter ist mit einer flüssigen, lichtempfindlichen Substanz, einem sogenannten Photopolymer, gefüllt. Ein Laserstrahl trifft gezielt auf die Oberfläche dieser Flüssigkeit und härtet sie an den Stellen aus, an denen das fertige Objekt entstehen soll. Nachdem eine dünne Schicht ausgehärtet ist, senkt sich die Plattform leicht ab, sodass eine neue Schicht der Flüssigkeit darüber fließen kann. Dieser Vorgang wiederholt sich, bis das gesamte 3D-Objekt Schicht für Schicht aufgebaut ist. Abschließend wird das ausgehärtete Modell gereinigt und oft noch mit UV-Licht weitergehärtet, um seine Stabilität zu erhöhen. 1986 gründete Hull das Unternehmen 3D Systems und brachte 1987 den ersten kommerziellen 3D-Drucker, den SLA-1, auf den Markt. Diese Erfindung war bahnbrechend und markierte den Beginn der industriellen Nutzung von 3D-Druck-Technologien!

Parallel zur Entwicklung der Stereolithografie entstanden weitere 3D-Druckverfahren. 1988 entwickelten Scott Crump und seine Frau Lisa das Fused Deposition Modeling (FDM)-Verfahren. Bei dieser Technik wird ein Kunststoff-Filament, das auf einer Rolle aufgewickelt ist, in einen Druckkopf eingeführt. Dort wird es erhitzt, bis es schmilzt, und dann durch eine feine Düse auf eine Druckplatte[18]. Der Druckkopf bewegt sich computergesteuert und trägt das geschmolzene Material Schicht für Schicht auf. Sobald eine Schicht abgekühlt ist, wird die nächste daraufgesetzt, bis das gesamte 3D-Objekt entsteht. Der Erfinder gründete daraufhin 1989 das Unternehmen Stratasys, das heute zu den führenden Herstellern von 3D-Druckern zählt.

Ein weiteres wichtiges Verfahren, das in dieser Zeit entwickelt wurde, ist das selektive Lasersintern (SLS). Dabei wird ein feines Pulver, zum Beispiel Kunststoff oder Metall, mithilfe eines Lasers punktgenau verschmolzen und Schicht für Schicht aufgebaut. Dieses Verfahren eröffnet eine Vielzahl von Möglichkeiten, da es die Herstellung komplexer Strukturen aus unterschiedlichsten Materialien wie Metallen, Keramiken und Hochleistungskunststoffen erlaubt.

In den 1990er-Jahren wurden die ersten kommerziellen 3D-Drucker auf den Markt gebracht. Viele Unternehmen trieben die Entwicklung weiter voran. Der 3D-Druck wurde zunächst vor allem in der industriellen Prototypenfertigung genutzt. Firmen in der Automobil- und Luftfahrtindustrie erkannten schnell die Vorteile dieser neuen Technologie, insbesondere für die schnelle und kostengünstige Herstellung von Prototypen.

Gleichzeitig wurden die Materialien verbessert. Während die ersten 3D-Drucker hauptsächlich mit Kunststoffen arbeiteten, führten neue Verfahren zur Verarbeitung von Metallen, Harzen und sogar biologischen Materialien.

Mit der Jahrtausendwende erlebte der 3D-Druck eine rasante Entwicklung. 2005 wurde mit dem RepRap-Projekt unter der Leitung von Dr. Adrian Bowyer an der University of Bath ein Open-Source-3D-Drucker ins Leben gerufen. Das Ziel von RepRap war es, einen selbstreplizierenden 3D-Drucker zu entwickeln, der sich teilweise selbst drucken, daher vermehren kann. Dieses Projekt legte den Grundstein für die heutige Maker-Bewegung und führte zur Erschaffung zahlreicher erschwinglicher 3D-Drucker für den Heimgebrauch.

In den 2010er-Jahren wurden 3D-Drucker immer günstiger und leistungsfähiger. Unternehmen wie MakerBot, Ultimaker und Prusa Research brachten 3D-Drucker auf den Markt, die für Privatpersonen und kleine Unternehmen erschwinglich waren.

[18] Extrudiert = In dünnen Streifen aufgetragen.

Gleichzeitig fanden immer mehr Anwendungen des 3D-Drucks den Weg in den Alltag, etwa in der Medizintechnik, im Design oder in der Lebensmittelindustrie.

Heute steht die Technologie des 3D-Drucks vor einer vielversprechenden Zukunft. Fortschritte in der Materialwissenschaft ermöglichen die Verarbeitung immer neuer Materialien, von Biopolymeren über Carbonfasern bis hin zu innovativen Metallen. In der Medizin wird der 3D-Druck bereits für die Herstellung von Prothesen, Implantaten und sogar organischen Geweben genutzt.

Ein weiteres spannendes Forschungsfeld ist der 3D-Druck von Gebäuden. Einige Firmen arbeiten sogar an 3D-gedruckten Häusern, die kostengünstig und nachhaltig sind. Ebenso gewinnt der 3D-Druck in der Raumfahrt an Bedeutung. Die NASA und SpaceX erforschen die Möglichkeit, auf dem Mars oder dem Mond mittels 3D-Druck Siedlungen zu errichten.

Oft wird befürchtet, dass der 3D-Druck das traditionelle Handwerk ablösen wird oder gar vernichtet, aber der 3D-Druck kann eher als Chance betrachtet werde.

So kann der Schreiner kleine Teile, Hilfsinstrumente, Modelle oder Designelemente 3D-Drucken, und so Zeit sparen und neue kompliziertere Möbel oder Objekte fertigen.

Weiter geht es jetzt mit dem Bau!

DER FINALE ZUSAMMENBAU!

Da alle Teile endlich entsprechend vorbereitet waren, begann der spannendste Moment des gesamten Projekts: der finale Zusammenbau! Es war der Augenblick, in dem all die Mühe, die Planung und die unzähligen Arbeitsstunden zu einem einzigen, funktionierenden Ganzen verschmelzen sollten.

Zuerst wurde der vordere Korpus vorsichtig auf die Bodenplatte mit den montierten Rollen gehoben. Es fühlte sich an, als würde das Projekt zum Leben erwachen. Doch der hintere Teil brachte noch einmal eine ordentliche Herausforderung mit sich. Der Linearaktuator musste millimetergenau in der Mitte der Bodenplatte verschraubt werden. Das obere Ende des Aktuators fand seinen Platz in der vorgesehenen Schachtführung am Hubkörper – ein Moment, der fast schon feierlich wirkte.

Die LEDs wurden an der kleinen Halterung oben am Hubkörper befestigt. Die Kabel wurden sorgfältig im hinteren, unteren Teil verborgen und zum Arduino geführt. Der Motor fand seinen Anschluss ebenfalls am Arduino.

Ein besonderes Highlight war die Kabeltrommel, die ich aus einem alten Staubsauger recycelte. Sie wurde an der inneren, hinteren Seitenwand montiert und mit einer Mehrfachsteckdose verbunden, die wiederum über eine Funksteckdose lief. Dies ermöglichte es mir, das gesamte System bequem per Fernbedienung an- und auszuschalten.

In die Mehrfachsteckdosenleiste wurden die Stromversorgungen für die LEDs, den Motor, den Arduino sowie eine weitere Mehrfachsteckdose gesteckt. Diese wurde an der Außenwand befestigt, um den Zugriff auf Stromquellen, z.B. zum Löten, zu erleichtern.

Die letzten entscheidenden Details kamen aus dem 3D-Drucker – personalisiert und exakt auf meine Bedürfnisse zugeschnitten:

1. Benutzerdefinierte Schubladeneinsätze, perfekt angepasst für mein Werkzeug.
2. Kleine Boxen für Schrauben, damit nie wieder eine Mutter verloren geht.
3. Schubladengriffe, robust und modern.
4. Eine Halterung für die Fernbedienung, immer griffbereit.
5. Und vieles mehr, dass diesem Projekt den letzten Schliff verlieh.

Und dann war es endlich so weit: Mein Werkzeugschrank stand vor mir, bereit für den Einsatz. Wie aufregend! Das Chaos hatte ein Ende! Doch war es wirklich das Ende? Wie Albert Einstein einst sagte:

Nichts kann existieren ohne Ordnung.
Nichts kann entstehen ohne Chaos.

Kaum war der Schrank fertig, begann mein Kopf bereits mit neuen Ideen zu spielen. Und so keimte schon das nächste Projekt – ein Schritt weiter Richtung Einstein, in die faszinierende Welt der Gravitation und die Geburt einer Gravitationsdrehwaage.



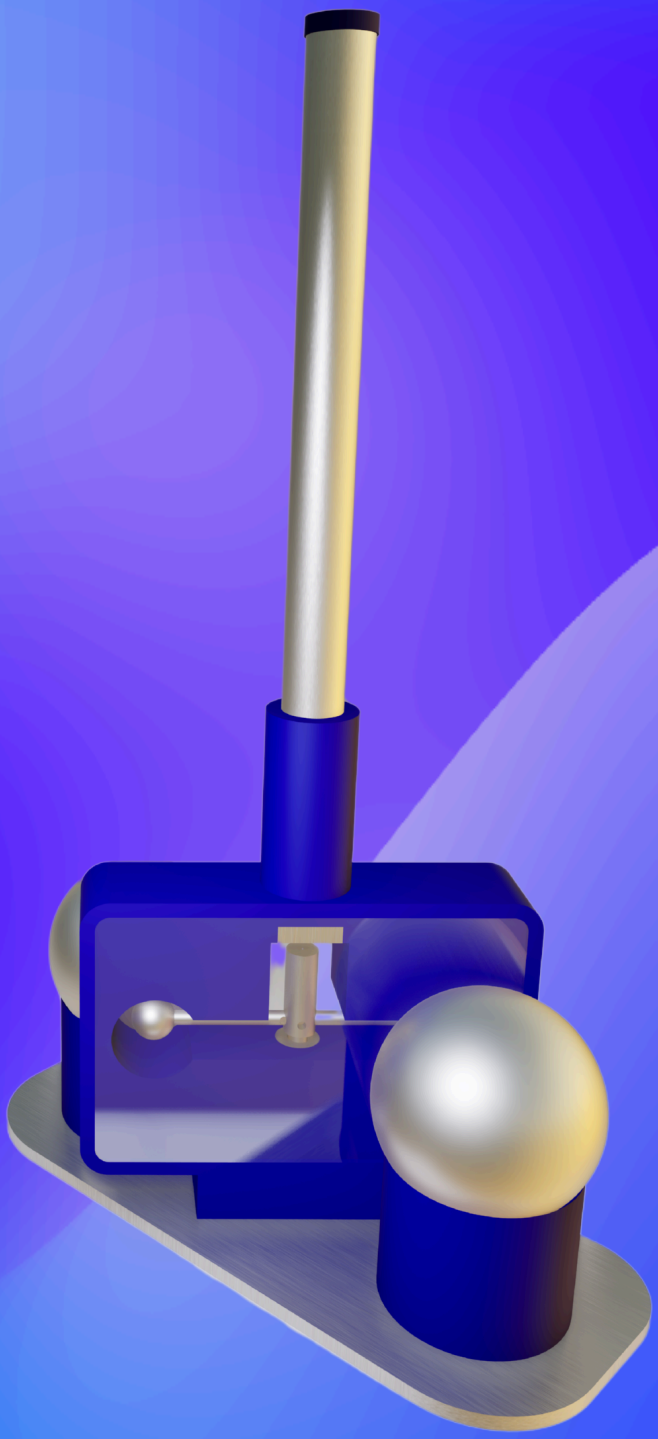
FAZIT

Das ganze Projekt stand und fiel mit dem Hubkörper, eine geeignete Lösung zu finden, die leicht und trotzdem stabil genug war. Ich begann mit dem schwierigsten Teil, zu experimentieren, zu basteln und eine passende Idee zu finden. Dieses Vorgehen war genau richtig.

Eine weitere bauliche Herausforderung waren die Schubladen, die sehr exakt werden mussten. Das Projekt begeisterte mich von Anfang bis Ende. Von meinen anfänglichen Ideen einen Werkzeugkasten zu bauen, wurde dann eine hochkomplexe Idee, die ich mit viel Spaß realisierte. Und mein Zimmer ist endlich aufgeräumt!

Das Experimentieren kann beginnen!

PROJEKT 2:
DIE GRAVITATIONSDREHWAAGE



PROJEKT 2:
DIE GRAVITATIONSDREHWAAGE

EINLEITUNG

Das physikalische Phänomen der Gravitation fasziniert und inspiriert mich schon immer und wirft zu gleich immer neue Fragen auf. Hier wollte ich ansetzen und forschen. Die allergrößten, aktuellen Fragen und Probleme der Physik sind fast vollständig auf die Gravitation und damit auf Einsteins revolutionäre Theorie, die Einstein'schen Feldgleichungen[19], zurückzuführen.

Die Gravitation ist überall: vom größten Stern mit Milliarden von Kilometern im Durchmesser über Häuser, Steine, uns Menschen und Alltagsobjekte wie Tassen oder Äpfel, bis hin zu Atomen und subatomaren Teilchen, dort überall wirkt diese mysteriöseste Kraft der Physik. In der Mathematik sorgt die Gravitation regelmäßig für massive Probleme. Man hat es geschafft alle anderen Grundkräfte der Physik zu vereinen: Elektromagnetismus, also Licht, Strom und Strahlung, schwache Wechselwirkung, der Zusammenhalt zwischen Atomen, dass was Moleküle erst ermöglicht und starke Wechselwirkung, die die einzelnen Bestandteile der Atome, die Quanten (Quarks, Elektronen, Gluonen) zusammenhält, in einer einzelnen Formel zu vereinen.

Nur sobald man die vierte Grundkraft, die Gravitation, versucht hinzuzufügen, tauchen seltsame mathematische Artefakte auf, unendliche Wahrscheinlichkeiten, negative Unendlichkeiten, was dazu führt, dass die Formeln unbrauchbar werden. In der Physik wird die Gravitation als Gravitationskonstante G, beschrieben. Es war schon immer ein Traum von mir, meine eigene Gravitationskonstante zu errechnen und zu schauen, wie nah ich an den Lehrbuchwert herankomme.

Für diese Aufgabe wurden schon milliardenteure Satelliten gebaut, um mit extrem präzisen Lasermessungen die Gravitationskonstante im All zu messen. Doch es gibt auch eine einfachere Möglichkeit, sich die Gravitation von handlichen Gegenständen zunutze zu machen, indem man eine Gravitationsdrehwaage baut.

Da ich jetzt ja endlich das Chaos in meinem Zimmer beseitigt habe, und meinen Werkzeugschrank, der ja auch als Werkbank agiert, gebaut habe, ist alles bereit für den Bau dieser Messvorrichtung. Es geht los!

[19] Die wohl bekannteste dieser Gleichungen ist $e=mc^2$.

DIE PLANUNG

Eine Drehwaage im Allgemeinen funktioniert mithilfe der Torsionskraft[20] eines extrem dünnen Drahtes, der an seinem unteren Ende eine Art Hantel befestigt hat, an dem das Versuchsobjekt befestigt ist. In meinem Fall sind an dieser kleinen T-förmigen „Hantel“ links und rechts jeweils eine kleine Stahlkugel befestigt. Außen, vor dem Gehäuse befinden sich zwei größere Kugeln, die mithilfe ihrer Massen, also ihrer Schwerkraft, die kleinen Kugeln anziehen und so die ganze Achse mit dem Draht verdrehen. Diese minimale Drehung kann mit einem Laser, der über einen kleinen Spiegel, der an der Mittelachse befestigt ist, reflektiert wird und so die Bewegung verstärkt, an die gegenüberliegende Wand strahlen. Erfunden wurde die Torsionswaage oder Drehwaage von Henry Cavendish 1797. Er war der erste, der diese zur Berechnung der Gravitationskonstante nutzte.

Zu Beginn musste ich sorgfältig planen. In der Wissenschaft, gerade bei physikalischen Messungen, muss alles extrem genau sein. Also setzte ich mich hin und entwarf ein erstes 3D-Modell. Ich überlegte mir, welche Größe die Kugeln haben sollten.



[20] Der Widerstand des Drahtes beim verdrillen.

Ich entschied mich für Ø15 mm bei den kleinen und Ø45mm bei den großen, da diese Maße relativ gut an die Sollmasse von 14 g und 1,5 kg heranreichten. Nach ein bisschen Hin und Her und einem ganzen Tag Planung und Perfektionierung war der Plan fertig. Im Anschluss recherchierte ich die Sachen, die ich brauche, um die Gravitationsdrehwaage zu bauen.

.Als horizontale Mittelachse wählte ich eine dünne Gewindestange[21], die mit ihrem Gewinde perfekt in die entsprechenden Löcher in den beiden kleinen Kugeln passt. Das Wichtigste und Schwierigste war, den richtigen Torsionsdraht zu bekommen, mit dem Suchbegriff Torsionskraft oder Torsionsband fand ich bei Amazon wenig, doch nach einiger Recherche fand ich bei AliExpress einen Kupfer-Beryllium[22] Draht mit nur 0,02 mm Durchmesser, also 20 µm (Mikrometer)!

Zu meinem Erstaunen war dieser Draht unglaublich stabil, man konnte ihn nicht mit einer Schere durchschneiden! Um alles stabil zu halten, wählte ich eine 1 m M12 [23] Gewindestange. Ich besorgte auch noch ein paar Muttern und Unterlegscheiben, sowie zwei kleine Glasplatten und das ganze luftdicht zu machen. Die Gravitationsdrehwaage ist so empfindlich gegenüber Luftströmen oder Erschütterungen, dass es reicht das jemand in 3 m Entfernung vorbeiläuft, um das „Pendel“ aus dem Gleichgewicht zu bringen.

Jetzt fehlte nur noch ein kleines Alurohr als Einhausung und Aufhängung für den Draht. Alle hauptstrukturellen Teile, wie der Hauptkörper, die Halterung für den Laser, die Auflage für die großen Kugeln sowie die vertikale Mittelachse druckte ich mit dem 3D-Drucker aus.

Für die Forschung ist der 3D-Drucker der reinste Segen!

Doch es gab ein Problem, da die großen Kugeln insgesamt ca. 3 kg wogen. Sie waren viel zu schwer für herkömmliche 3D-Drucke, also musste ich die Halterung bei einer Firma aus Aluminium herstellen lassen.

[21] Einer Art Schraube ohne Kopf.
[22] Ein Metall.
[23] Metrische Schrauben Bezeichnung, M12 = 12mmØ.

DER ZUSAMMENBAU

Nachdem die letzten Päckchen eingetroffen und die 3D-gedruckten Elemente gedruckt waren, begann der Zusammenbau. Zuerst wurde das Alurohr in die dafür vorgesehene Öffnung im Hauptkörper gesteckt. Dann kam der filigrane Draht an die Reihe. Sorgsam führte ich ihn in die obere Kappe, die sich später als entscheidend für die Nullpunktjustierung erweisen sollte. Sie passte perfekt in das obere Ende des Alurohrs.

Es folgte der etwas knifflige Teil: die Befestigung des Drahtes an der vertikalen Mittelachse. Alles war etwas fummelig, der Draht unglaublich dünn, alles hat gewackelt und dort war wenig Platz für meine Finger! Nachdem dies fertig war, wurden die horizontale Achse an der vertikalen und schließlich die Kugeln befestigt. Doch ein entscheidendes Problem stellte sich heraus: die extreme Empfindlichkeit der Apparatur. Sie durfte keinesfalls auf dem Boden stehen, wo jede noch so geringe Vibration die Messung zunichtemachen würde…

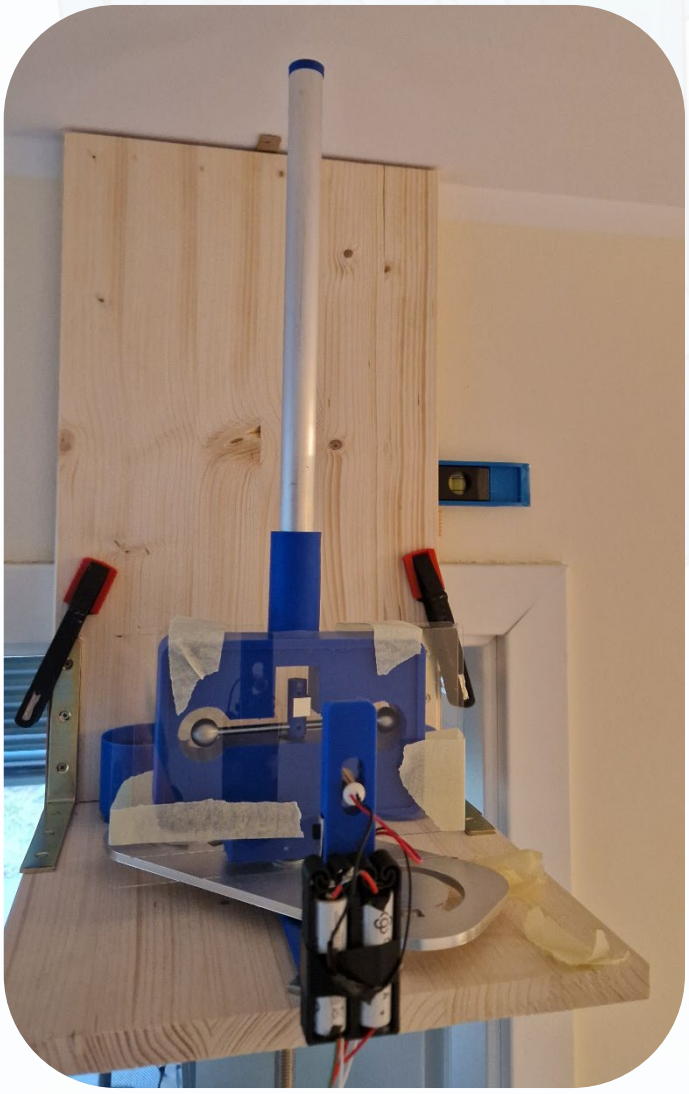


Verzweiflung kam jedoch nicht auf, stattdessen blühte eine, zugegeben, etwas unkonventionelle Idee auf. Was wäre, wenn man die gesamte Apparatur an einem Holzgestell mit Schraubzwingen an der Wand, kurz unter der Decke, befestigen wurde? Ein waghalsiger Plan, der jedoch die Lösung des Problems versprach.

Ein Ausflug in den Baumarkt folgte. Zwei einfache, günstige Platten wurden erworben und zu einem stabilen L-Winkel verschraubt. In die horizontale Platte bohrte ich ein Loch, das perfekt auf die Stange abgestimmt war. Nachdem alles andere mit Muttern und Unterlegscheiben am oberen Ende der Stange fixiert war, musste diese nur noch durch das Loch geschoben und mit den Zwingen bombenfest an der Wand befestigt werden.

Der Laser, das Herzstück der Messung, wurde in seine Halterung geschoben und festgeschraubt. Mit ruhiger Hand verlötete ich die beiden Batterien und den Schalter, die ihm das Leben einhauchen sollten. Abschließend klebte ich den kleinen Spiegel mit äußerster Sorgfalt an der Mittelachse fest.

Und dann, nach Stunden der Arbeit und der Überwindung von Hindernissen, war es so weit: Fertig zum Messen!!! Ein Gefühl der Aufregung und der Erwartung durchströmte mich. Die Jagd nach dem Unsichtbaren, nach dem Flüchtigen konnte beginnen!

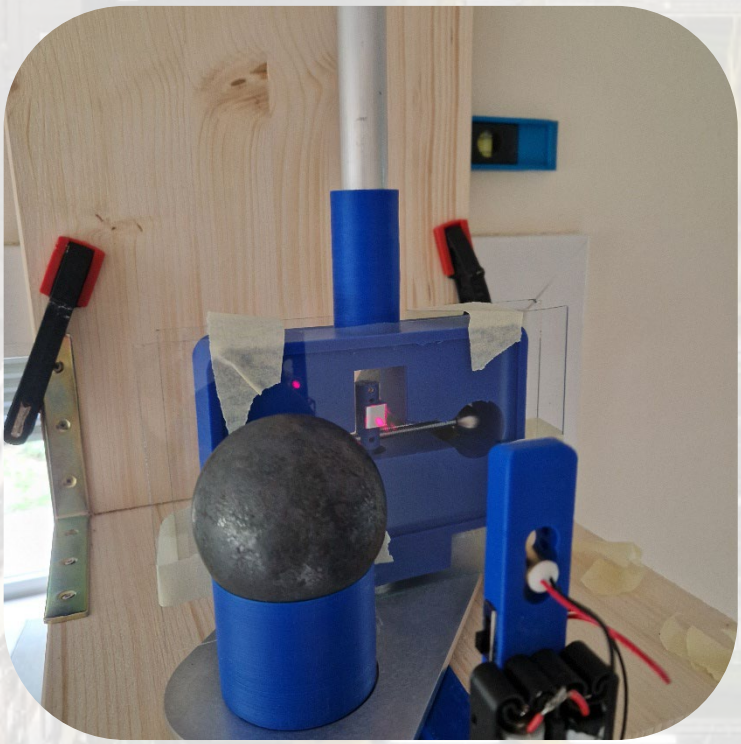


DIE MESSUNG

Bevor überhaupt gemessen werden konnte, musste zuerst geklärt werden, mit welchen Werten man es überhaupt zu tun hat. Die Massen, die Geometrie, die Abstände – all das bildet die Grundlage für alles Weitere.

Die großen Kugeln, die als „Gravitationsanzieher" fungieren, wogen jeweils etwa 1,4 Kilogramm. Die kleineren Kugeln am drehbaren Balken waren rund hundertmal leichter, nämlich etwa 14 Gramm schwer. Diese Werte wurden mit einer Präzisionswaage bestimmt – denn selbst kleine Fehler hätten sich direkt auf die spätere Berechnung ausgewirkt.

Aber Masse allein reicht nicht. Auch die exakten Abstände zwischen den Kugeln mussten vermessen werden. Mit Lineal und Messschieber maß ich den Abstand zwischen den beiden kleinen Kugeln am drehbaren Balken: rund 10,5 Zentimeter – wichtig, weil dieser Wert das Trägheitsverhalten[24] des Pendels beeinflusst. Ebenso wichtig war der Abstand zwischen einer kleinen Kugel und der ihr am nächsten stehende große Kugel – etwa 5,25 Zentimeter. Dieser Wert ist besonders sensibel, denn die Gravitationskraft hängt quadratisch vom Abstand ab: Wird er nur leicht falsch gemessen, kann das große Auswirkungen haben.



[24] Wie träge das Pendel sich dreht.

Der Draht, an dem das gesamte Pendel aufgehängt ist, spielt eine zentrale Rolle – er sorgt dafür, dass sich das System nach einer Drehung wieder zurückbewegt. Seine „Verdrehsteifigkeit“ nennt man Torsionskonstante, abgekürzt κ. Sie lässt sich nicht direkt messen, aber aus dem Schwingungsverhalten des Pendels erschließen.

Um das zu tun, wurden die großen Massen zunächst entfernt, dass sie keine messbare Anziehung mehr auf die kleinen Kugeln ausübten. Dann wurde der Balken leicht verdreht – gerade so viel, dass er schwingen konnte, ohne dabei zu pendeln wie ein Schaukelstuhl. Ziel war eine reine Torsionsschwingung, also nur eine Drehung um die vertikale Achse.

Doch der Weg dorthin war nicht ohne Hürden. Der ursprünglich verwendete Draht – ein besonders dünner Stahlfaden – entpuppte sich als ungeeignet. Er sollte eigentlich fein genug für langsame Schwingungen sein, zeigte aber eine viel zu schnelle Bewegung: Nur etwa 87 Sekunden für eine volle Drehung hin und zurück. Das passte nicht zu den theoretischen Erwartungen. Wahrscheinlich war der Draht aus einem zu harten Material – jedenfalls musste ich ihn durch einen feinen Kupferdraht ersetzen, um zu realistischen, gut messbaren Schwingungsdauern zu kommen. Diesen Draht korrekt in die Löcher einzufädeln war unglaublich fummelig, am Ende habe ich ihn mit Sekundenkleber festgeklebt.

Bei der eigentlichen Messung der Schwingung zeigte sich schließlich ein erfreuliches Bild: Nach dem Auslenken[25] pendelte das System ruhig hin und her, und für acht vollständige Schwingungen wurde die Zeit mit einer Stoppuhr gemessen. So konnte der Mittelwert einer einzelnen Periode bestimmt werden. Diese betrug etwa 594 Sekunden – fast zehn Minuten – und entsprach damit genau dem, was man von einem empfindlichen Torsionspendel erwarten würde.

Jetzt ging es an den spannendsten und aufregendsten Teil: Die eigentliche Messung der Gravitation! Wie aber misst man die winzige Drehung, die die Gravitation tatsächlich verursacht? Eine direkte Winkelmessung ist hier kaum möglich – die Bewegung ist einfach zu klein. Doch ein einfacher Trick sorgt dafür, dass selbst winzige Drehungen sichtbar werden: ein Laserstrahl, der auf einen kleinen Spiegel an der Drehachse trifft und auf weit entfernte Skala reflektiert wird.

Das Prinzip ist simpel, aber effektiv: Dreht sich der Balken um einen winzigen Winkel, bewegt sich der Lichtpunkt auf der Skala um ein Vielfaches davon – der sogenannte optische Hebel. Um diese Bewegung zu messen, ließ ich erst den Lichtpunkt sich beruhigen, bis er still in der Nulllage stand. An dieser Stelle machte ich auf einem Klebebandstreifen auf der gegenüberliegenden Wand einen Strich. Dann waren ruhige Hände gefragt, ich musste die beiden 1,5 kg Kugeln möglichst

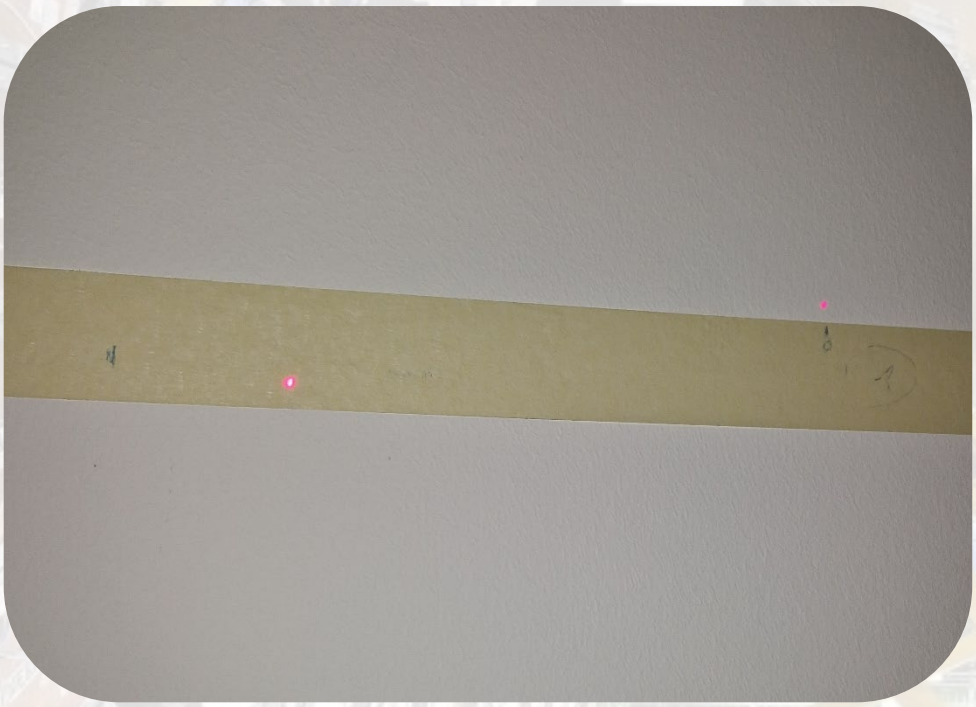
[25] Verdrehung.

gleichzeitig und ohne die ganze Apparatur in Schwingung zu versetzen, in die Halterungen setzen.

Doch Vorsicht: Schon kleinste Luftzüge, Temperaturunterschiede oder eine leichte Erschütterung konnten dazu führen, dass der Lichtpunkt zitterte oder langsam wanderte. Deswegen befestigte ich die Apparatur aufwendig mit Zwingen und einer Holzkonstruktion an der Wand. Gegen den Luftzug befestigte ich zwei kleine Plexiglasplatten an den Seiten.

Der erste Versuch, Spannung lag in der Luft, doch seltsamerweise drehte sich das Pendel in die falsche Richtung! Das war auf jeden Fall nicht das erhoffte Ergebnis. Nach etwas Fehlersuche fand ich den Fehler: Die Plexiglasplatten sind extrem anfällig für elektrostatische Aufladung, was aber wieder bewies, wie empfindlich das Ganze ist. Gott sei Dank hatte ich noch zwei kleine Platten Echtglas rumliegen, die ich statt der Plexiglasplatten verbauen konnte.

Nun, beim zweiten Versuch, zeichnete sich ganz langsam ab, Schwingung für Schwingung, dass das Experiment funktionieren könnte. Nach ca. einer dreiviertel Stunde kam der Punkt zum Stillstand! Der Unterschied zwischen den beiden Messpunkten – etwa 1,18 cm war perfekt, wie erwartet!!!

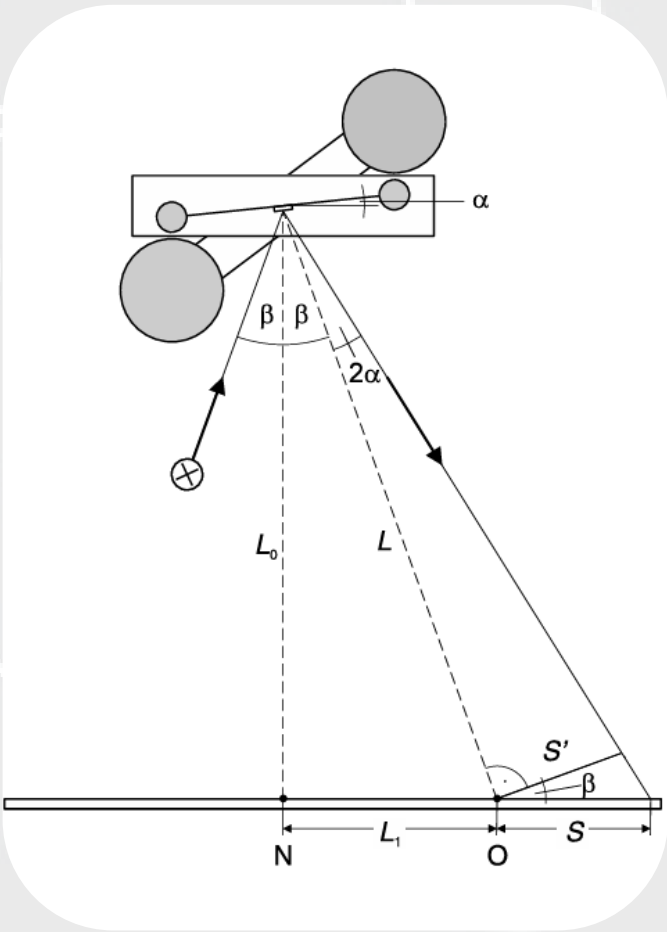


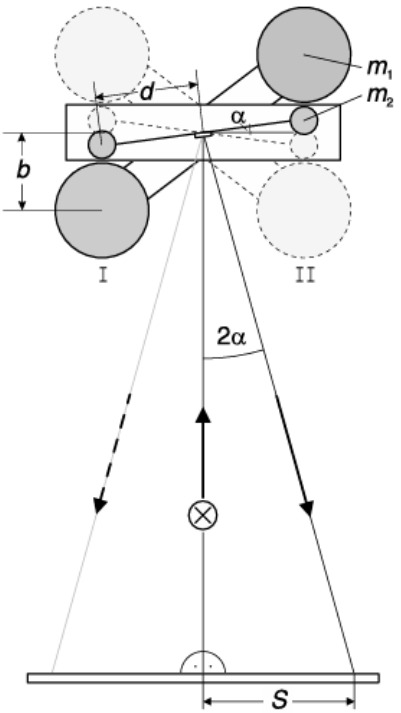
Jetzt fehlten nur noch einige geometrische Daten. Der Abstand von der Drehachse zur Skala betrug etwa 1,11 Meter, was wichtig war, um den optischen Hebel in die tatsächliche Winkelveränderung zurückzurechnen.

DIE BERECHNUNG DER KONSTANTE

Nachdem ich im vorherigen Kapitel alle Messungen durchgeführt hatte – Massen, Abstände, Schwingungsperiode und beginnt nun die Phase der Mathematik. Es galt, aus diesen Rohdaten die schwer fassbare Gravitationskonstante **G** zu extrahieren.

Die Auswertung basiert auf der etablierten Endausschlagmethode[26], bei der das Gleichgewicht zwischen Gravitationsmoment[27] und Torsionsmoment im Zentrum steht. Ein Momentum in der Physik ist kein Zeitpunkt, sondern die Drehwirkung einer Kraft, wie bei einem Schraubschlüssel. Der Weg von den scheinbar simplen Messwerten hin zur präzisen Naturkonstante ist ein Paradebeispiel für die Kraft der experimentellen Physik und der theoretischen Physik, also Mathematik im Zusammenspiel. Übersicht über alle Variablen:





[26] Endausschlagmethode: Ein Messverfahren, bei dem die maximale Auslenkung eines Torsionspendels gemessen wird, um die wirkende Kraft (hier die Gravitationskraft) zu bestimmen.

Bevor wir die wirkenden Kräfte berechnen können, benötigen wir eine zentrale Eigenschaft des schwingenden Systems: sein Trägheitsmoment. Es beschreibt, wie stark sich ein Körper der Drehbewegung widersetzt, also wie „träge“ er gegenüber einer Änderung seines Rotationszustands ist.

In unserem Aufbau besteht das Pendel aus einem dünnen Stab, an dessen Enden sich zwei kleine Kugeln mit der Masse m befinden. Der Stab selbst wird als masselos angenommen, da das die Berechnung erheblich vereinfacht. In der Physik werden oft bestimmte Daten weggelassen. Würde man mit allem rechnen, bräuchte man Supercomputer. Das ist mit ein Grund, warum die Quantenphysik so kompliziert ist, da dort „einfach weglassen“ nicht funktioniert. Die Kugeln rotieren um den Mittelpunkt des Stabs mit dem Abstand l zueinander. Die Formel für das Trägheitsmoment:

$$I = 2 \cdot m \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

Mit den Messwerten:

- $m = 0,0014\ kg$
- $l = 0,105\,\mathrm{m}$

Ergibt sich:

$$I = 2 \times 0,014 \times \left(\frac{0,105}{2}\right)^2 = 0,028 \times 0.00275625^{\,2} \approx 7,7175 \times 10^{-5}\ kg \cdot m^2$$

Die Torsionskonstante **κ** charakterisiert, wie steif oder elastisch der Aufhängedraht gegenüber Verdrehungen ist.

Sie lässt sich aus der Schwingungsperiode **T** des Pendels und dem gerade bestimmten Trägheitsmoment **I** berechnen. Zur Erinnerung: **T** ist die Zeit für eine volle Schwingung und **I** ist das Maß für die Trägheit des Pendels gegenüber Drehungen. Die Formel für die Periodendauer eines Torsionspendels lautet:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{\kappa}} \quad \Rightarrow \quad \kappa = \frac{4\pi^2 I}{T^2}$$

Mit:

- $I = 7,7175 \times 10^{-5} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
- $T = 594 \text{s}$

Ergibt sich:

$$\kappa = \frac{4\pi^2 \cdot 7,7175 \times 10^{-5} kg \cdot m^2}{(594\ s)^2} \approx \frac{3,048 \times 10^{-3}}{352836\ s} \approx 8,6386 \times 10^{-9} \text{Nm/rad}$$

Dieser äußerst kleine Wert zeigt die hohe Empfindlichkeit des Drahtes – ein Muss, um überhaupt auf die winzigen Gravitationswirkungen reagieren zu können.

Die Gravitationsanziehung der großen Kugeln verdreht den Balken um einen kleinen Winkel **θ**. Der griechische Buchstabe **θ** (Theta) steht hier für den Winkel, um den der Draht durch die Gravitationsanziehung verdreht wird. Dieser Winkel wird über den optischen Hebel[28] bestimmt. Aus der gemessenen Verschiebung des Lichtpunkts auf der Skala (**ΔS**) und der Geometrie des Laseraufbaus (**L0, L1**) wird der Winkel berechnet. **Δ** (Delta) ist das griechische Symbol für eine Differenz oder Änderung. **S** steht für die Position des Lichtpunkts auf der Skala. **ΔS** ist also die *Strecke*, um die sich der Lichtpunkt auf der Skala verschoben hat.

[28] Der 'optische Hebel' ist ein Trick, um winzige Winkeländerungen sichtbar zu machen. Man befestigt einen kleinen Spiegel am Pendelstab und leuchtet mit einem Laser darauf. Der reflektierte Laserstrahl trifft auf eine entfernte Skala. Wenn sich das Pendel auch nur minimal dreht, schwenkt der reflektierte Strahl über eine viel größere, gut messbare Strecke auf der Skala. Wie ein langer mechanischer Hebel eine kleine Bewegung am einen Ende in eine große Bewegung am anderen Ende übersetzt, 'vergrößert' hier der lange Lichtweg die kleine Winkeländerung in eine große Streckenänderung.

Die zugrunde liegende Formel basiert auf der Winkelverdopplung[29], die bei Reflexion auftritt, und der sogenannten Kleinwinkelnäherung. Die Kleinwinkelnäherung ist eine Methode, die auf dem Bogenmaß basiert. Das Bogenmaß ist eine andere Art, Winkel zu messen. Ein Vollkreis hat 360 Grad oder 2π Bogenmaß. Die Kleinwinkelnäherung funktioniert nur, wenn der Winkel im Bogenmaß eingesetzt wird. Die Einheit ist rad.

$$\theta \approx \frac{\Delta S}{2 \cdot \sqrt{L_0{}^2 + L_1{}^2}}$$

Mit:

- $\Delta S = 1,18\,\text{cm} = 0,0118\,\text{m}$
- $L_0 = 1,11\,\text{m}, L_1 = 0,119\,\text{m}$

Erhalten wir:

$$\theta \approx \frac{0,0118}{2 \cdot \sqrt{1,11^2 + 0,119^2}} \approx 0,00527\,\text{rad}$$

Ein unscheinbarer Wert – doch in diesem winzigen Winkel steckt die ganze Kraft der Gravitation, die gegen die Rückstellkraft des Drahtes arbeitet.

Jetzt werden alle Teilergebnisse kombiniert. Im stationären Zustand stehen sich das Gravitationsdrehmoment und das Torsionsdrehmoment (verursacht durch den verdrehten Draht) im Gleichgewicht. Im Gleichgewicht sind diese beiden Drehwirkungen – die Gravitation, die das Pendel verdrehen will, und der Draht, der sich zurückdrehen will – *exakt gleich stark*, aber entgegengesetzt gerichtet. Deshalb bewegt sich nichts mehr.

$$G \cdot \frac{(M \cdot m \cdot l)}{b^2} = \kappa \cdot \theta$$

Nach **G** aufgelöst ergibt sich:

$$G_{\text{unkorr}} = \frac{\kappa \cdot \theta \cdot b^2}{M \cdot m \cdot l}$$

[29] Wenn sich ein Spiegel um einen Winkel θ dreht, ändert sich der Winkel des *reflektierten* Lichtstrahls um das Doppelte, also 2θ. Das liegt am Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel).

Eingesetzte Werte:

- $\kappa = 8,6386 \times 10^{-9}\,\mathrm{N \cdot m/rad}$
- $\theta = 0,00527\,rad$
- $b = 0,0525\,\mathrm{m}$
  $M = 1,4\,\mathrm{kg},$
- $m = 0,014\,\mathrm{kg},$
  $l = 0,105\,\mathrm{m}$

$$G_{\text{unkorr}} = \frac{8,6386 \times 10^{-9} \cdot 0,00527 \cdot 0,00275625}{0,002058}$$

$$\approx \frac{1,254 \times 10^{-12}}{0,002058}$$

$$\approx 6,093 \times 10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$$

Dies ist der zunächst berechnete Wert für **G**[30], ohne Berücksichtigung zusätzlicher geometrischer Effekte. Bisher habe ich so getan, als würde *nur* die direkt benachbarte große Kugel die kleine Kugel am Pendel anziehen und eine Drehung verursachen.

Die Realität ist aber komplexer: Auch die andere große Masse übt eine Anziehungskraft auf die kleine Kugel aus. Die Anziehungskraft dieser *entfernteren* großen Kugel versucht, das Pendel in die *entgegengesetzte Richtung* zu drehen als die nahe große Kugel. Sie arbeitet also gegen die Haupt-Drehwirkung. Dieser Einfluss reduziert das beobachtbare Drehmoment leicht, was durch einen rein geometrisch bestimmten Korrekturfaktor **K** ausgeglichen wird:

[30] Dieser Wert für **G** wurde gerade eben berechnet, indem wir das (vereinfachte) Gravitationsdrehmoment dem Torsionsdrehmoment gleichgesetzt haben.

$$K = \frac{1}{1 - \left(\frac{b}{\sqrt{l^2 + b^2}} \right)^3}$$

Mit:

- $l = 0,105\,\mathrm{m}$
- $b = 0,0525\,\mathrm{m}$

$$K \approx \frac{1}{1 - \left(\frac{0,0525}{\sqrt{0,105^2 + 0,0525^2}} \right)^3} \approx 1,0982$$

Ein Wert leicht über 1 ist passend zur Vorstellung, dass die Gegenkraft einen Teil des gemessenen Effekts „ausbremst".

Nun ergibt sich der korrigierte Wert für die Gravitationskonstante durch Multiplikation mit dem Korrekturfaktor:

$$G = G_{\text{unkorr}} \cdot K = 6,093 \times 10^{-11} \cdot 1,0982 \approx 6,691 \times 10^{-11}\,\mathrm{Nm^2/kg^2}$$

G ≈ 6.691 x 10^{-11} N·m²/kg²

Um zu verstehen, wie klein diese Zahl ist: Das entspricht:

0.00000000006691 N·m²/kg²

Diese extreme Winzigkeit erklärt, warum wir Gravitation im Alltag nur bei riesigen Massen wie der Erde spüren. Die etwas komplex aussehende Einheit (Newton-Meter-Quadrat pro Kilogramm-Quadrat) stellt sicher, dass **G** in Newtons Gravitationsgesetz korrekt die Anziehungskraft zwischen Massen beschreibt.

Der aktuell anerkannte Wert für **G** liegt bei etwa 6.674 x 10^{-11} N·m²/kg². Mein gemessener Wert liegt also **nur 0,25 % darüber!** Angesichts der Tatsache, dass **G** extrem schwierig zu messen ist, da die Gravitationskraft so schwach ist und leicht von Störungen überlagert wird, war ich sehr überrascht und erfreut, wie exakt meine Messung geworden ist. Und das mit nicht Laborausrüstung bzw. unter ganz normalen Haushaltsbedingungen! Das war ein großartiges Experiment!!!

Wer noch tiefer eintauchen will, lade ich ein, auf eine faszinierende Reise in die Welt der Gravitation mit mir zu gehen…



EINE KURZE GESCHICHTE ÜBER GRAVITATION, DIE ERDE UND DAS UNIVERSUM

Stell dir einen Moment lang vor, du schwebst. Schwerelos, ohne oben und unten, ohne das vertraute Gefühl des Bodens unter deinen Füßen. Ein Zustand, den nur wenige Menschen je erlebt haben, der uns aber sofort die Allgegenwart einer Kraft bewusst macht, die wir sonst kaum wahrnehmen: die **Gravitation**. Sie ist die unsichtbare Hand, die uns auf der Erde festhält, die den Mond auf seiner Bahn um unseren Planeten zwingt und die Sterne und Galaxien im kosmischen Tanz dirigiert. Sie ist eine der vier fundamentalen Kräfte der Natur, und doch ist sie in vielerlei Hinsicht die rätselhafteste und faszinierendste von allen.

Im Alltag begegnet uns die Gravitation – oder Schwerkraft, wie wir sie oft nennen – auf Schritt und Tritt. Der Apfel, der vom Baum fällt, der Ball, der nach einem Wurf unweigerlich zur Erde zurückkehrt, das Wasser, das bergab fließt, ja sogar das Gefühl unseres eigenen Körpergewichts – all das ist das Werk der Gravitation. Sie erscheint uns so selbstverständlich, dass wir ihre tiefere Bedeutung leicht übersehen.

Jahrtausendelang beobachteten die Menschen diese Phänomene. Sie sahen Himmelskörper über den Himmel ziehen, erkannten Muster, entwickelten Mythen und erste astronomische Modelle. Doch das Warum blieb im Dunkeln. Warum fallen Dinge nach unten? Warum kreist der Mond um die Erde? Es brauchte das Genie eines Mannes, um den ersten großen Schleier dieses Mysteriums zu lüften.

Die Legende erzählt von Sir Isaac Newton, der im 17. Jahrhundert unter einem Apfelbaum saß und beobachtete, wie eine Frucht zu Boden fiel. Ob diese Geschichte wahr ist oder nicht, sie symbolisiert perfekt den revolutionären Gedankensprung, den Newton vollzog. Er erkannte, dass dieselbe Kraft, die den Apfel fallen lässt, auch den Mond in seiner Umlaufbahn hält. Es war keine separate, himmlische Kraft und eine irdische Kraft, sondern eine universelle Kraft: die Gravitation.

Newton formulierte sein bahnbrechendes Gravitationsgesetz in einer eleganten mathematischen Formel. Sie besagt, dass sich zwei beliebige Massen im Universum gegenseitig anziehen. Die Stärke dieser Anziehungskraft ist dabei direkt proportional zum Produkt ihrer Massen (je massereicher die Objekte, desto stärker die Anziehung) und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes (je weiter die Objekte voneinander entfernt sind, desto schwächer wird die Kraft – und zwar exponentiell!).

Dies war eine Errungenschaft! Plötzlich konnten die Bewegungen der Planeten mit derselben Physik erklärt werden wie das Fallen eines Steins. Newtons Gesetz war unglaublich erfolgreich. Es ermöglichte präzise Vorhersagen von Planetenbahnen, Kometenbewegungen und Gezeiten. Es wurde zum Fundament der klassischen Mechanik und prägte unser Verständnis des Universums für über zwei Jahrhunderte.

Doch so mächtig Newtons Theorie auch war, sie hatte ihre Grenzen und ließ entscheidende Fragen offen. Die größte davon war die Frage nach dem Wie. Wie „überträgt“ sich diese Kraft durch das Nichts des Weltraums? Wie kann diese Kraft scheinbar augenblicklich über riesige Distanzen wirken? Newton selbst bezeichnete diese „Fernwirkung" als ein Rätsel, eine Eigenschaft der Natur, die er beschreiben, aber nicht erklären konnte. Zudem gab es kleine, aber hartnäckige Abweichungen, wie die leichte Verschiebung der Umlaufbahn des Merkur, die Newtons Theorie nicht vollständig erklären konnte.

Es bedurfte eines weiteren revolutionären Geistes, um unser Verständnis der Gravitation auf eine völlig neue Stufe zu heben: Albert Einstein. Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie, die ein radikal anderes Bild der Gravitation zeichnete.

Einstein schlug vor, dass Gravitation gar keine Kraft im herkömmlichen Sinne ist, die zwischen Objekten wirkt. Stattdessen ist Gravitation eine Eigenschaft der Raumzeit selbst. Stell dir das Universum als ein riesiges, flexibles Tuch vor – das ist die Raumzeit, eine vierdimensionale Struktur[31], die Raum und Zeit vereint. Massereiche Objekte wie Sterne und Planeten hinterlassen in diesem Tuch eine „Delle" – sie krümmen die Raumzeit um sich herum. Kleinere Objekte, wie ein Planet, der einen Stern umkreist, oder ein Apfel, der zur Erde fällt, folgen einfach den "Geraden" in dieser gekrümmten Raumzeit. Sie werden nicht angezogen, sondern bewegen sich entlang der durch die Masse verursachten Krümmung. Denn wenn du vorher eine gerade Linie auf dieses Tuch zeichnen würdest und dann die Masse hineinlegst, würde sich diese gerade Linie krümmen, genauso bewegen sich alle Körper im Weltraum auch nur auf ihren natürlichen „geraden“ Linien, den Geodäten, die von den Massen gekrümmt werden.

Man kann es sich wie eine Bowlingkugel vorstellen, die auf ein Trampolin gelegt wird und eine Mulde erzeugt. Rollt nun eine Murmel in die Nähe, wird sie nicht direkt von der Bowlingkugel „angezogen", sondern folgt der Krümmung des Trampolins und rollt auf die Kugel zu.

[31] 3 Raumdimensionen: Hoch/runter, Links/Rechts, Vor/Zurück, + 1 Zeitdimension = 4 Dimensionen.

Diese neue Sichtweise war nicht nur konzeptionell atemberaubend, sie machte auch präzise Vorhersagen, die sich von Newtons Theorie unterschieden und experimentell überprüft werden konnten. Eine der berühmtesten Bestätigungen war die Beobachtung der Ablenkung von Sternenlicht während einer Sonnenfinsternis im Jahr 1919. Genau wie von Einstein vorhergesagt, wurde das Licht von Sternen, das nahe an der Sonne vorbeizog, durch die von der Sonnenmasse verursachte Raumzeitkrümmung leicht abgelenkt. Auch die rätselhafte Bahn des Merkur konnte Einsteins Theorie perfekt erklären. Die Allgemeine Relativitätstheorie revolutionierte die Physik und unser Bild vom Kosmos.

Auf den größten Skalen ist die Gravitation die dominierende Kraft im Universum. Sie ist der kosmische Baumeister. Nach dem Urknall war es die Gravitation, die winzige Dichteschwankungen im jungen Universum verstärkte und dafür sorgte, dass Materie begann, sich zu verklumpen. Aus diesen Verklumpungen entstanden die ersten Sterne und Galaxien.

Die Gravitation hält Galaxien zusammen und formt riesige Galaxienhaufen und Superhaufen – die größten bekannten Strukturen im Universum. Sie diktiert die Bahnen von Sternen innerhalb von Galaxien und von Galaxien innerhalb von Haufen. Ohne die stetige, unsichtbare Hand der Gravitation würde das Universum, wie wir es kennen, einfach auseinanderfliegen.

Die Gravitation kann aber auch extreme Formen annehmen. Wenn ein sehr massereicher Stern am Ende seines Lebens kollabiert, kann die Gravitationskraft so überwältigend werden, dass sie sogar die Atome zerquetscht und die Materie auf einen unvorstellbar dichten Punkt komprimiert. Das Ergebnis ist ein Schwarzes Loch – ein Objekt mit einer so starken Gravitation, dass nicht einmal Licht ihm entkommen kann, wenn es dessen "Ereignishorizont" überschreitet. Schwarze Löcher sind die ultimativen Beispiele der Raumzeitkrümmung, wie sie Einstein beschrieben hat – Abgründe im Gewebe der Raum-Zeit, des Kosmos.

Trotz der enormen Erfolge von Newtons und Einsteins Theorien ist die Geschichte der Gravitation noch lange nicht zu Ende. Tatsächlich stehen wir heute vor neuen, tiefgreifenden Rätseln.

Eines der größten ungelösten Probleme der modernen Physik ist die Unvereinbarkeit von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie, die die Gravitation und das Universum im Großen beschreibt, und der Quantenmechanik, die die Welt der Atome und subatomaren Teilchen im Kleinen regiert. Diese beiden Säulen der modernen Physik scheinen grundlegend verschieden zu sein und lassen sich nicht ohne weiteres zu einer einzigen umfassenden „Theorie von allem" vereinen. Wie verhält sich die Gravitation auf kleinsten Skalen, zum Beispiel im Inneren eines Schwarzen Lochs oder im Moment des Urknalls? Die Suche nach einer Theorie der

"Quantengravitation" ist eine der größten Herausforderungen für Physiker heute. Theorien wie die Stringtheorie oder die Schleifenquantengravitation versuchen, diese Lücke zu schließen, sind aber noch weit von einer experimentellen Bestätigung entfernt.

Darüber hinaus haben astronomische Beobachtungen ergeben, dass die sichtbare Materie – Sterne, Planeten, Gaswolken – nur einen kleinen Bruchteil der gesamten Masse und Energie im Universum ausmacht. Der größte Teil scheint aus "Dunkler Materie" und "Dunkler Energie" zu bestehen – mysteriöse Substanzen, die wir nicht direkt sehen können, deren gravitative Wirkung wir aber auf die Bewegung von Galaxien und die beschleunigte Expansion des Universums beobachten. Was genau diese dunklen Komponenten sind und wie sie mit unserem Verständnis der Gravitation zusammenhängen, ist ein weiteres großes Rätsel. Denn die sichtbare Materie, alles, was wir sehen, Sterne, Planeten, Nebel und auch wir Menschen machen nur 4,9 % des gesamten Universums aus, der Rest gliedert sich in 26,8 % dunkle Materie sowie 69,3 % dunkle Energie!

Eine aufregende neue Entwicklung war die direkte Messung von Gravitationswellen im Jahr 2015 – winzige Wellen oder Kräuselungen in der Raumzeit selbst, die von katastrophalen kosmischen Ereignissen wie der Kollision von Schwarzen Löchern oder Neutronensternen ausgesandt werden. Diese Entdeckung, die Einsteins Theorie erneut bestätigte, hat ein völlig neues Fenster zum Universum geöffnet und erlaubt uns, die extremsten gravitativen Phänomene direkt zu „hören".

Die Gravitation – sie ist so vertraut und doch so fremd. Sie hält unsere Füße auf dem Boden und formt gleichzeitig das Schicksal des gesamten Kosmos. Von Newtons Apfel über Einsteins gekrümmte Raumzeit bis hin zu den Rätseln der Dunklen Materie und der Quantengravitation spannt sich eine faszinierende Geschichte menschlicher Neugier und wissenschaftlicher Entdeckungen.

Sie ist die stille Dirigentin des kosmischen Balletts, eine Kraft, die Welten bindet und Galaxien formt. Auch wenn wir schon viel über sie gelernt haben, bleibt die Gravitation eine Quelle des Staunens und ein Motor für die zukünftige Erforschung des Universums. Ihre unsichtbare Hand wird uns weiterhin leiten, während wir versuchen, die tiefsten Geheimnisse des Kosmos zu entschlüsseln. Die Reise in die Welt der Gravitation hat gerade erst begonnen.

LEARNINGS

Wie ich mich austoben konnte:

- Meinen Ideen freien Lauf lassen.
- Ein großes Schreinerprojekt eigenverantwortlich von der Konzeption über Design, Feinzeichnungen bis zur Materialwahl und Umsetzung gestalten.

Was ich gelernt habe:

- Mir Python und C++ selbst beizubringen und in der Praxis anzuwenden.
- Intensiv mit CAD-Software und 3D-Druck zu arbeiten – Entwürfe zu entwickeln, zu testen und immer weiter zu verfeinern.

Wichtig für mein Projekt war:

- Kreative und technische Probleme eigenständig und gestalterisch zu lösen.
- Präzises Arbeiten mit verschiedenen Werkzeugen und Materialien.
- Technisches Zeichnen und das Übertragen in digitale Planungsschritte.
- Der Austausch mit meinem Mentor Gerhard, der meine Ideen immer unterstützt und mich motiviert hat.

Meine Liebe zum Holz. Meine Faszination ist das Universum.

ANHANG PROJEKT 1:

ZEIT- UND KOSTENAUFSTELLUNG

Zeitlich arbeitete ich seit Herbst 2024 an diesem Projekt, das erst ca. Mitte Mai 2025 fertig wird. Ich hätte es wahrscheinlich schneller machen können, aber die Schreinerei war immer nur freitags geöffnet. Aus diesem Grund fing ich auch das zweite Projekt an, da ich unter der Woche ja Zeit hatte. Die Planung ging ziemlich schnell. Zu den Kosten:

Was?	Kosten
Holz/Material	Ca. 400 €
Elektronik	Ca. 130 €
Werkstattgebühr	125 €
GESAMT:	Ca. 655 €

Da ich in der Werkstatt mitgeholfen und Gartenarbeit in der Nachbarschaft geleistet habe, habe ich die Hälfte der Kosten selbst verdient.

ANHANG PROJEKT 2:

ZEIT- UND KOSTENAUFSTELLUNG

An diesem Projekt habe ich von Februar bis April 2025 gearbeitet. Die Messung und die Berechnung haben 3 Tage gedauert, die meine Mutter in den Wahnsinn trieb, da ich mit dem Konstrukt den ganzen Flur in Anspruch genommen habe.

Was?	Kosten
Druck/Material	Ca. 30 €
Elektronik/Laser	8 €
Alurohr, Kugeln	45 €
Sonstiges	50 €
GESAMT:	Ca. 125 €