

# Fallversuch zur phänomenologischen Erarbeitung der Fallgesetze und der Erdbeschleunigung 10. Klasse

---

## 1. Vorbemerkungen

*Nach der Lehrplanangabe von Rudolf Steiner sollen die SchülerInnen der 10. Klasse die Wurfbahn genau verstehen. Eine Voraussetzung dafür bilden die Fallgesetze. Bei vielen Versuchen zu den Gesetzmässigkeiten des freien Falles kann die Erdbeschleunigung bestimmt werden mit der heute sehr genau zu erfassenden Fallzeit und der Messung der Fallhöhe. Allerdings werden dabei die bekannten Formeln vorausgesetzt, um daraus dann die Erdbeschleunigung zu berechnen. Auch beim Versuch zur Bestimmung der Fallbeschleunigung nach Whiting wird zwar auf die genaue Zeitmessung verzichtet (sie wird durch die Schwingdauer des Pendels definiert), aber die Erdbeschleunigung kann dann aus der Zeit und der Fallhöhe auch nur durch die vorausgesetzten Formeln berechnet werden. Bei dem hier beschriebenen Versuch können sowohl die Fallgesetzmässigkeiten als auch die Erdbeschleunigung phänomenologisch erarbeitet werden. Eine Bohrmaschine bewirkt das Drehen des Körpers, der dann während des Fallens Tinte verspritzt und dadurch eine sich öffnende Spirale in einem Rohr aufzeichnet, die dann mit der Klasse analysiert werden kann.*

## 2. Ziele für den hier vorgestellten Versuch

- Qualitatives Erfassen der Gesetzmässigkeiten beim Freien Fall aus den Messergebnissen
- Bestimmung der Erdbeschleunigung als Geschwindigkeitszunahme zuerst pro Zeiteinheit während einer Umdrehung
- Bestimmung der Erdbeschleunigung als Geschwindigkeitszunahme pro Sekunde mithilfe der Drehzahl der Bohrmaschine
- Erklärung, dass die Erdbeschleunigung eine Geschwindigkeitszunahme pro Sekunde ist (denn was soll denn  $\text{m}/\text{Sek.}^2$  sonst bedeuten!)

Bemerkung: Das Baulot (Senkblei) hat eine ideale Form zum Drehen (Schwungmasse) und mit der zugespitzten Form zum Fallen. Sollte die Drehzahl der Bohrmaschine nicht angegeben sein bzw. nicht gemessen werden können, so gelingt es, die Gesetzmässigkeiten trotzdem zu ermitteln, wenn die Zeit pro Umdrehung als eine «Lotsekunde» bezeichnet wird!

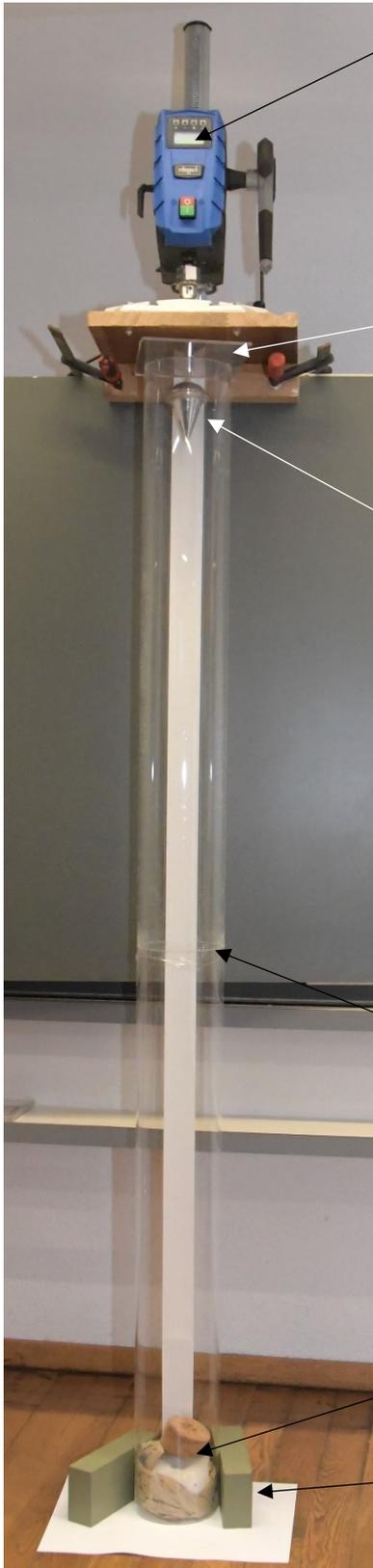
Die Gesetzmässigkeiten sind:

- **Die Fallhöhe nimmt quadratisch mit der Umdrehungszahl bzw. der Zeit zu**
- **Die Fallgeschwindigkeit nimmt linear mit der Umdrehungszahl bzw. der Zeit zu**

## 3. Material

- Bohrmaschine (wenn möglich mit Drehzahlanzeige; z.B. Tischbohrmaschine der Firma Alpina24AG, 710 Watt; Artikelnummer 49180)
- Baulot (Senklot) wenn möglich mit 1 kg Gewicht
- Laborschlauch
- Tinte und Spritze zum Füllen des Schlauches
- Kunststofffaden mit Durchmesser 2 mm (z. B. Trimmerschnur aus Nylon)
- Plexiglasrohr 2 Stück je 1 m lang, Durchmesser 15 cm
- Plexiglasplatte ca. 20 cm x 25 cm, 4 – 5 mm dick zum Fixieren des drehenden Lots
- Brett aus Massivholz (Grösse je nach Bohrmaschinenfuss, mindestens 2,5 cm dick) und angeschraubtem Holzbalken, Querschnitt 6 cm x 6 cm
- 3 Schraubzwingen zum Befestigen des Holzbretts mit der Bohrmaschine an der Wandtafel
- Papierstreifen 2,2 m lang und ca. 5 cm breit zum Ausmessen der Fallhöhen
- Meterband oder Doppelmeterstab

## 4. Versuchsaufbau



Digital anzeigende Bohrmaschine (eingestellt auf 1500 UpM)

Brett befestigt mit 3 Schraubzwingen an der Wandtafel

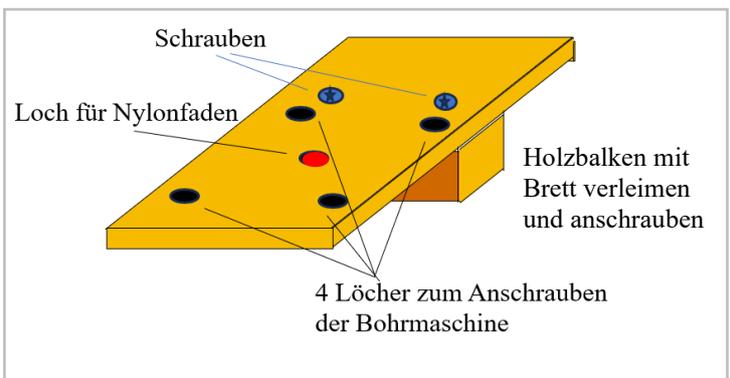
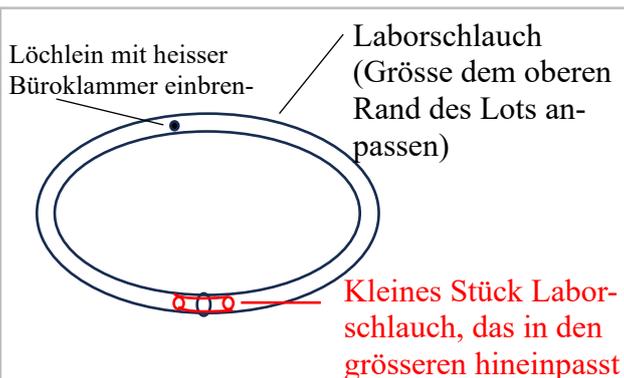
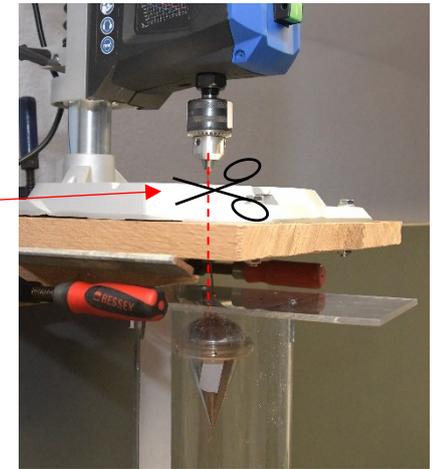
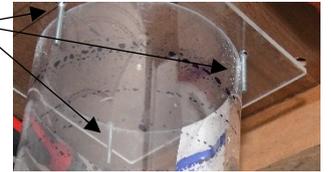
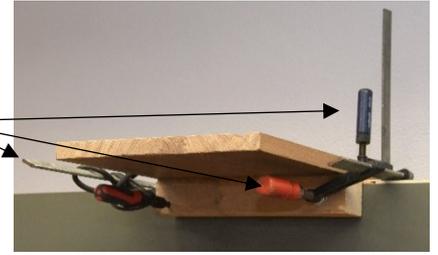
Plexiglasdeckel mit Loch (3 Schrauben ohne Muttern fixieren es von aussen auf dem Rohr)

1 kg schweres, kegelförmiges Bau- lot (oder Senklot), um das ein mit Tinte gefüllter Schlauch mit Löchlein festgeklebt ist. Während des Drehens muss mit einer Schere der 2 mm dicke **Nylonfaden** durchtrennt werden, so dass dann die Spritzer im 2 m hohen Schutzrohr eine nach unten sich öffnende Spirale aufzeichnen.

Plexiglasrohr als Spritzschutz und zum Aufzeichnen der sich öffnenden Spirale. Der eingeklebte Papierstreifen kann dann heraus genommen werden zum Messen der Fallhöhen nach jeder Umdrehung.

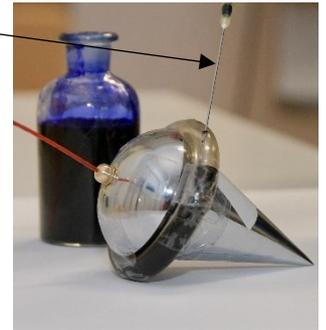
Polstermaterial und Korkzapfen zum Auffangen des Lots

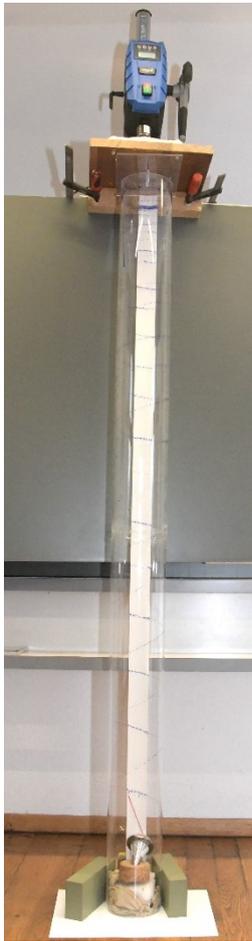
Bleiklötze (können evtl. im Voraus richtig platziert werden, damit dann das fertige Schutzrohr richtig positioniert ist)



## 5. Versuchsdurchführung

1. Holzbrett mit Schraubzwingen an der Wandtafel gut befestigen
2. Bohrmaschine auf das Brett setzen, unbedingt mit Schrauben befestigen
3. Wandtafelhöhe so verstellen, dass das Rohr gut unter dem Brett Platz hat und durch Unterlegen mit einem Stuhl oder anderen Hilfsmitteln fixieren
4. Die zwei Plexiglasrohre und den Papierstreifen senkrecht im Plexiglasrohr mit Kleband fixieren
5. Unten im Plexiglasrohr irgendein etwa 6 – 10 cm dickes Polster aus Styropor, Kork oder ähnlichem Material einbringen
6. Lot gemäss Skizze in das Bohrfutter einspannen und Plexiglasrohr senkrecht unter dem Bohrfutter ausrichten
7. Prüfen, ob das Lot senkrecht hängt und gut dreht
8. Wenn alles klappt, den Schlauch um das Lot mit Hilfe einer Spritze mit Tinte füllen
9. Schere bereitlegen
10. Bohrmaschine mit vorher eingestellter Drehzahl einschalten und sobald das Lot stabil dreht, den Nylonfaden rasch mit einer Schere durchtrennen (Faden muss zentral zwischen den Schenkeln der Schere sein), so dass das Lot herunterfällt und dabei laufend seine Bahn mit Tintenspritzern im Rohr aufzeichnet
11. Prüfen, ob die aufgezeichnete und nach unten hin sich öffnende Spirale gut aussieht (wenn nicht, Versuch wiederholen nach dem Auswaschen der Tinte im Rohr)
12. Lot und Papierstreifen herausnehmen, restliche Tinte mit Spritze herausaugen und mit Wasser durchspülen
13. Fallhöhen auf dem Papierstreifen nach jeder Umdrehung messen (falls der Beginn unklar ist wegen der vielen Spritzer, kann er auch grafisch ermittelt werden)





Die Spirale ist deutlich zu erkennen und die Abstände werden auf dem Papierstreifen festgehalten.

Im Plexiglasrohr zeigen die Tintenspritzer eine sich nach unten immer mehr öffnende Spirale. Auf dem Papierstreifen ist natürlich nur ein Teil dieser Spirale. Dieser kann herausgenommen, an die Wandtafel geklebt und ausgemessen werden.

Bei genauem Hinsehen ändert sich die Tropfenform von rund bis länglich nach unten. Es ist wichtig, dass die SchülerInnen dies genau beobachten, damit selbst die mathematisch weniger begabten SchülerInnen die Fallgesetzmässigkeiten qualitativ aus dem Bild der Spirale erfassen können.

## 6. Auswertung mit **Beispiel (blau markiert)**

1. Versuchsbeschreibung durch die SchülerInnen erstellen lassen
2. Besprechung zur Art der aufgezeichneten Spirale
3. Zeitberechnung aus der Drehzahl der Bohrmaschine (im Beispiel war sie 1500 Umdrehungen pro Minute)

$$1500 \text{ UpM} : 60 \text{ Sek./Min.} = 25 \text{ Umdrehungen pro Sekunde}$$

$$\text{Zeit pro Umdrehung} = 1 : 25 \text{ Umdr./Sek.} = 0.04 \text{ Sek./Umdrehung}$$

4. Berechnung der Fallzeit

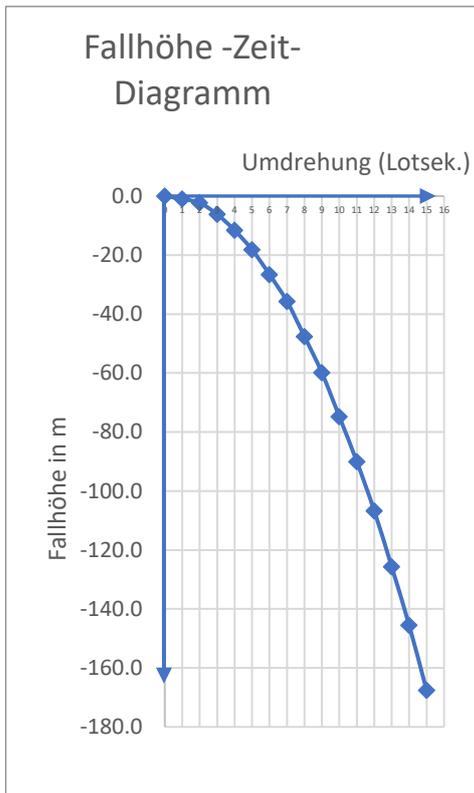
$$\text{Fallzeit} = \text{Zeit für 15 Umdrehungen} = 15 * 0.04 \text{ Sek.} = 0.60 \text{ Sek.}$$

$$(\text{Theoretische Fallzeit } t = \sqrt{2 * h/g} = \sqrt{2 * 1.676/9.81} = 0.585 \text{ Sek.})$$

5. Ausmessen der Fallhöhen nach jeder Umdrehung und festhalten der Werte in einer Tabelle (1 Umdrehung kann als Lotsekunde bezeichnet werden)

Umdrehung Nr. bzw. Lotsek. (LS)	Fallhöhe (cm)
0	0.0
1	-1.0
2	-2.3
3	-6.2
4	-11.6
5	-18.2
6	-26.6
7	-35.7
8	-47.6
9	-59.9
10	-74.8
11	-90.0
12	-106.7
13	-125.7
14	-145.5
15	-167.6

6. Aufzeichnen des Weg-Zeit-Diagrammes (Lotsek.)



7. Herausfinden der Abhängigkeit der Fallhöhe von der Fallzeit
  8. Berechnen der Differenzen der Abstände zwischen den Umdrehungen (entspricht der Geschwindigkeitszunahme pro Umdrehung)
  9. Aufzeichnen des Geschwindigkeits-Zeit-Diagrammes
  10. Ermitteln des Faktors, wie die Fallhöhe mit der Zeit zunimmt (Fallhöhe in m \* einen Zeitfaktor oder entsprechend der Form der Kurve \* Zeitfaktor im Quadrat?)
- Zeit pro Umdrehung = 0.04 Sek.

Ausprobieren

- a)  $h/t$
- b)  $h/t^2$

Faktor $f = h:t$	Faktor $f = h:t^2$
0.25	6.25
0.29	3.59
0.52	4.31
0.73	4.53
0.91	4.55
1.11	4.62
1.28	4.55
1.49	4.65
1.66	4.62
1.87	4.68
2.05	4.65
2.22	4.63
2.42	4.65
2.60	4.64
2.79	4.66

} Ausreisser

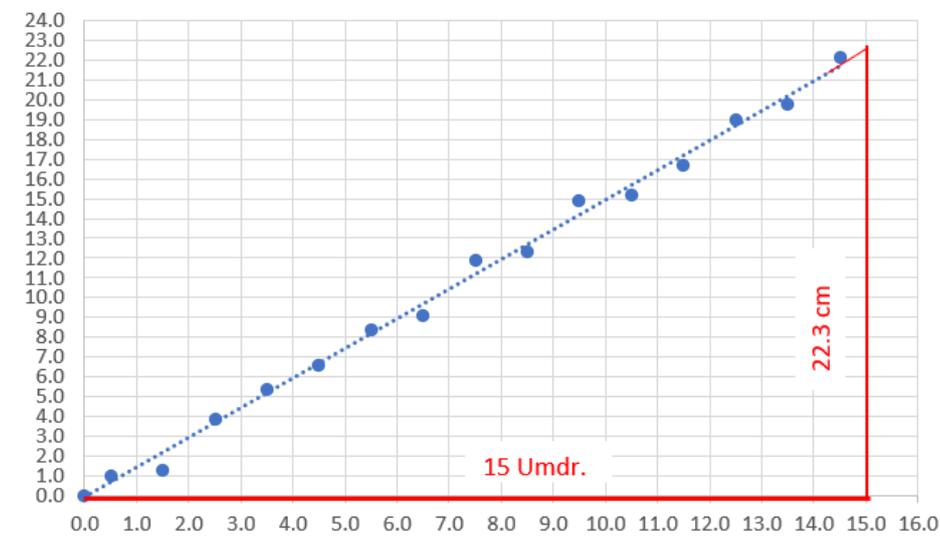
Die Vermutung, dass das Diagramm eine quadratische Funktion aufzeigt, bestätigt sich durch den konstant bleibenden Faktor, wenn die Zeit  $t$  im Quadrat genommen wird (ausser bei den ersten beiden Ausreissern). Der Faktor ist  $g/2$ .

$$\text{Fallhöhe } h \approx 4.65 \cdot t^2$$

14. Berechnung der Geschwindigkeitszunahme pro Umdrehung und erstellen des Diagrammes (Geschwindigkeitszunahme-Zeit-Diagramm)

Umdrehung Nr. bzw. Lotsek. (LS)	Fallhöhe (cm)	Differenz (cm)
0	0.0	
1	-1.0	1.0
2	-2.3	1.3
3	-6.2	3.9
4	-11.6	5.4
5	-18.2	6.6
6	-26.6	8.4
7	-35.7	9.1
8	-47.6	11.9
9	-59.9	12.3
10	-74.8	14.9
11	-90.0	15.2
12	-106.7	16.7
13	-125.7	19.0
14	-145.5	19.8
15	-167.6	22.1

Geschwindigkeitszunahme-Zeit-Diagramm



Berechnung der durchschnittlichen Geschwindigkeitszunahme

$$22.6 \text{ cm} / 15 \text{ Umdrehungen} = 1.507 \text{ cm/Umdrehung} = 1.507 \text{ cm} / 0.04 \text{ Sek.} \\ = 37.7 \text{ cm/Sek.} = 0.377 \text{ m/Sek.}$$

15. Berechnung der Geschwindigkeit nach der letzten, 15. Umdrehung

$$\text{Geschwindigkeit nach 15 Umdrehungen} = 15 * 0.377 \text{ m/Sek.} = 5.66 \text{ m/Sek.}$$

16. Berechnung der Geschwindigkeitszunahme pro Sekunde (entspricht der Erdbeschleunigung)

Die 5.66 m/Sek. werden nach 0.60 Sek. Fallzeit erreicht. Somit ergibt sie die

$$\text{Geschwindigkeitszunahme pro Sek.} = \frac{5.66 \frac{\text{m}}{\text{Sek.}}}{0.60 \text{ Sek.}} = 9.43 \frac{\text{m}}{\text{Sek.} * \text{Sek.}}$$

Diese Geschwindigkeitszunahme nennt man beim freien Fall Erdbeschleunigung.

$$v = g * t \approx 9.5 * t$$

Beim Ausmitteln ergibt sich eine Gerade. Dies zeigt, dass die Geschwindigkeitszunahme linear steigt mit der Zeit.

## 7. Schlussbemerkungen

Die Grundidee dieses Versuches geht auf einen Mitarbeiter des damaligen Technikums in Winterthur (heutige Fachhochschule) zurück. Er führte ihn auch aus und wies darauf hin, dass er mit einem drehenden Lot und einer Schnur in der Bohrmaschine gemacht werden könnte. Dies faszinierte und der Nachbau und die Optimierung gelangen.

Der Wert für die Erdbeschleunigung wird beim Versuch nicht immer gleich gross ausfallen. Im vorliegenden Beispiel war sie zu tief gegenüber dem theoretischen Wert von  $9.81 \frac{m}{sek.^2}$ . Der 10. Klasse aber kann befriedigend erklärt werden, dass bei optimalen Versuchsbedingungen und mit Vakuum der Literaturwert erhalten wird. Wichtig ist, dass die Fallgesetzmässigkeiten und die Erdbeschleunigung phänomenologisch und ohne Voraussetzungen ermittelt werden können.

Ein besonderer Dank gilt Anika Maler, die die Fotos und das Video aufgenommen hat und auch im Unterricht dabei war. Sie hat durch ihre Fragen und Hinweise mitgeholfen, diesen Fallversuch in der Elternschaft der Rudolf Steiner Schule Kreuzlingen bekannt zu machen.

Der Verfasser dieses Artikels hat den Versuch seit vielen Jahren durchgeführt und jetzt dank der neuen Bohrmaschine mit Drehzahlanzeige optimiert. Er ist der Ansicht, dass dieser phänomenologisch aufgebaute Versuch bestens für die 10. Klasse geeignet und trotz einigem Aufwand durchzuführen ist. Gerne nimmt er Hinweis zur weiteren Verbesserung, Kritik und Lob entgegen, denn letztlich soll dieser geniale Versuch im Unterricht wertvolle Dienste leisten für die Schülerinnen und Schüler der 10. Klassen und auch für die LehrerInnen.

19.12.2024/Alois Heigl  
alois.heigl@rssk.ch