

Lernblatt - Einführung ins Experimentieren

Stefan Petersen, Eike Hellberg / CC BY 4.0 / ipho@ipho.info

„The principle of science, the definition, almost, is the following: The test of all knowledge is experiment.“

(R. P. Feynman, 1963)

Naturwissenschaftliches Experimentieren

Ziel von Naturwissenschaften ist ein Verständnis der Realität. Zur Beschreibung der Realität werden *Modelle* verwendet, die Teile der Realität vereinfacht abbilden und Vorhersagen zu Phänomenen erlauben. *Experimente* erlauben durch gezielte *Beobachtung* und *Manipulation* Modelle zu prüfen und zu verbessern. Damit sind Experimente das zentrale Element der Naturwissenschaften.

Naturwissenschaftliches Experimentieren ist ein mehrstufiger Prozess, der sich grob in eine vorbereitende Betrachtung, die Durchführung und die Analyse gliedert und oft mehrfach durchlaufen wird.

Schritte im Experimentierprozess

1. Fragestellung und Hypothese entwickeln
2. Experiment planen
3. Versuch aufbauen
4. Experiment durchführen
5. Daten analysieren
6. Ergebnis evaluieren & Fehler abschätzen

↑
ggf. wiederholen

1 Fragestellung und Hypothese entwickeln

Bei experimentellen Aufgaben in der Physik-Olympiade ist eine *Fragestellung* oft vorgegeben. *Hypothesen* sind die experimentell zu überprüfenden Annahmen über das verwendete Modell bzw. den Ausgang eines Experimentes. Sie werden nicht geraten sondern ergeben sich aus Modellannahmen und darauf aufbauenden theoretischen Überlegungen. Beim freien Fall z.B. ist eine Hypothese, dass die Fallzeit proportional zur Wurzel der Fallhöhe ist.

2 Experiment planen

Die *Planung* eines Experimentes ist wichtig und setzt ein Verständnis des verwendeten Modells vor-

aus. In der Planung sollten folgende Fragen berücksichtigt werden: Welche Größen beeinflussen das Messergebnis? Wie lässt sich ein nutzbarer (mathematischer) Zusammenhang zwischen diesen und dem Ergebnis herstellen? Welche Größe(n) soll(en) gemessen werden? Wie kann ich diese gezielt variieren oder fixieren (Variablenkontrolle)? Wie können diese möglichst genau bestimmt werden? Wo stoße ich evtl. an Grenzen meines Modells? Das Planen eines Experimentes ist immer auch die Suche nach einem geeigneten Kompromiss.

3 Versuch aufbauen

Für den *Versuchsaufbau* muss überlegt werden, wie das Material und der Platz möglichst sinnvoll genutzt werden können. Dabei sollte der Experimentierplatz möglichst gut aufgeräumt sein. Zur Dokumentation des Aufbaus sollte eine nachvollziehbare Beschreibung (z.B. in Form einer Skizze) mit Angabe der relevanten Bestandteile und Größen erstellt werden.

4 Experiment durchführen

Bei der *Durchführung* eines Experimentes sollten die Versuchsbedingungen so gut wie möglich kontrolliert sein. Dazu gehören das systematische variieren von Variablen und das Dokumentieren von Bedingungen, die nicht verändert werden (sollen). Experimente sollten mehrfach durchgeführt werden. Änderungen und Auffälligkeiten bei der Durchführung sollten notiert werden.

Bei quantitativen Experimenten werden *Messwerte* aufgenommen. Anzahl, Wiederholungen und Platzierung der Messwerte sollten dabei sinnvoll¹ gewählt werden. Die Werte sollten in einer Tabelle notiert werden, die eine Bezeichnung der gemessenen Größen und ihre Einheiten enthält. Dabei

¹Das ist nicht immer einfach zu beurteilen. Als Faustregel sollten aber der gesamte für die Messung zur Verfügung stehende Bereich abgedeckt und dort mehr Messwerte aufgenommen werden, wo für die Auswertung wichtiges Verhalten erwartet wird. Wenn möglich, sollten Messungen wiederholt werden.

sollten alle von Messgeräten angezeigten Stellen aufgenommen werden. Zu den Messwerten gehört auch eine Abschätzung von deren Unsicherheit und eine Prüfung auf Plausibilität, um frühzeitig offensichtlich falsche Messungen zu identifizieren. Oftmals ist es praktisch aus den Messwerten gleich für die Auswertung notwendige Größen zu berechnen (z.B. Mittelwert bei Mehrfachmessungen).

5 Daten analysieren

Auswerten - Der Weg zum Ergebnis

Bei quantitativen Experimenten ist das Ergebnis eine (manchmal auch mehrere) Größe y , die von den im Experiment betrachteten Variablen x_1, x_2, \dots abhängt. Die Hypothese und die Versuchsplanung sollten einen theoretischen, funktionalen Zusammenhang $y = f(x_1, x_2, \dots)$ postulieren. Nimmt man diesen Zusammenhang als gegeben, ergeben sich drei grundsätzliche Möglichkeiten bei der *Auswertung*: 1. Sind alle Variablen im Versuch fixiert, lässt sich $y = f(x_1, x_2, \dots)$ direkt aus den Messwerten berechnen (Mehrfachmessung mit Mittelwertbildung) 2. Wird im Experiment genau eine Variable x variiert, kann der funktionale Zusammenhang $y = f(x)$ ausgewertet werden, um y zu bestimmen 3. Wurden in dem Experiment gleichzeitig mehrere Variablen variiert, sollte die Planung noch einmal überdacht werden. Meist ist das keine gute Idee.

Auswertung - Linearisierung

Bei Variation einer Variablen erfolgt die *Auswertung* durch Untersuchung des Verhaltens der *Messgröße* als Funktion einer *Variablen*, beispielsweise

$$I = \frac{U}{R} \quad h = h_0 - \frac{1}{2} g t^2 \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Hier könnten R , g und k die gesuchten Größen sein. Zur Auswertung empfiehlt sich in der Regel eine Linearisierung des Zusammenhanges zu einem Zusammenhang der Form $y = ax + b$. Warum? Lineare Zusammenhänge² lassen sich gut graphisch anpassen und dabei Abweichungen erkennen. Außerdem lassen sich die Geradenparameter leicht ablesen und die gesuchten Größen daraus bestimmen. Linearisierungen für die Beispiele sind: $I = \frac{1}{R} U$, $h = h_0 - \frac{1}{2} g t^2$ und $T^2 = \frac{4\pi^2}{k} m$.

²Zusätzliche Informationen zum Linearisieren sind in Folien zum Experimentieren in der PhysikOlympiade zu finden.

6 Ergebnis evaluieren & Fehler abschätzen

Angabe von Ergebnissen

Die aus den Messwerten ermittelten *Ergebnisse* bestehen aus einem Zahlenwert und einer physikalischen Einheit. Bei den Einheiten ist auf eine konsistente Verwendung zu achten (g und kg sind nicht identisch). Üblicherweise werden Ergebnisse in (abgeleiteten) SI-Einheiten angegeben. Zahlenwerte sollten mit einer sinnvollen Anzahl *signifikanter Stellen* oder gültiger Ziffern angegeben werden, das sind alle angegebenen Ziffern außer führender Nullen. Als Faustregel werden Endergebnisse auf die Anzahl signifikanter Stellen gerundet, die alle zur Berechnung verwendeten Werte besitzen (manchmal wird eine mehr angegeben). Ausnahmen bilden ganzzahlige Werte wie Vorfaktoren oder Anzahlen. Beispiel: $E = \frac{1}{2} \cdot 67,4 \text{ kg} \cdot (4,0 \text{ m s}^{-1})^2 \approx 5,4 \cdot 10^2 \text{ J}$. Die Anzahl signifikanter Stellen gibt Auskunft darüber, wie unsicher ein Ergebnis ist.

Ziel des Experimentierens ist ein möglichst genaues Ergebnis. *Genauigkeit* ist eine Kombination aus Richtigkeit (Maß, wie nah der Mittelwert am tatsächlichen Wert ist) und Präzision (Maß für Streuung der Einzelmessungen). Zur Beurteilung der Genauigkeit ist eine Abschätzung der Unsicherheit erforderlich.

Fehlerbetrachtungen

Zu Messwerten und Ergebnissen gehören Angaben zur Unsicherheit (Fehler). Bei Kenntnis der Unsicherheit werden Zahlenwerte auf die erste oder zweite Stelle des Fehlers gerundet, z.B.: $U = (10,67 \pm 0,26) \text{ V}$ oder $U = (10,7 \pm 0,3) \text{ V}$. Ein Ergebnis ohne Angabe der Unsicherheit ist wenig sinnvoll, da unklar bleibt, wie verlässlich das Ergebnis ist. Für die Ermittlung der Unsicherheiten müssen folgende *Fehlerquellen* berücksichtigt werden:

- I. *Fehler der Instrumente*: Hierzu gehören die Genauigkeit benutzter Geräte und Bauteile (z.B. Auflösungsgenauigkeit bei Skalen und digitalen Messgeräten, Genauigkeit bei Widerstandsangaben). Bei vielen Messgeräten und Bauteilen sind diese angegeben. Zu berücksichtigen ist auch eine mögliche falsche Kalibrierung oder Tarierung (Waage).
- II. *Fehler der Experimentierenden*: Neben Ablesefehlern, z.B. aufgrund unterschiedlicher Blickwinkel bei Zeigerinstrumenten, gehören hierzu auch

menschliche Unzulänglichkeiten wie eine Variation der Reaktionszeit, ungenaue Positionierung, falsches Ablesen oder Abzählen (z.B. der Periodenzahl bei Schwingungen), Gewöhnungseffekte bei wiederholten Messungen oder der Wunsch nach konsistenten Werten.

III. *Fehler des Modells*: Annahmen und Realität müssen nicht übereinstimmen. Typische Modellfehler beim Experimentieren können z.B. sein: Vernachlässigen von Kräften, Verwenden ungültiger Näherungen (Kleinwinkelnäherung, „näherungsweise konstant“, ...), Verwenden von Eigenschaften von Bauteilen, die nicht universell gelten (konstanter Widerstandswert, hookesche Feder, ...), strom- vs. spannungsrichtige Messschaltung.

Diese drei Fehlerquellen führen zu zwei grundsätzlich unterschiedlichen *Fehlerarten*, die sich zum Gesamtfehler addieren:

i. *Systematische Fehler* können in Form von Offsets (z.B. als Zeitversatz durch feste Reaktionszeiten), einer Drift der Messwerte (z.B. beim Erhitzen von Bauteilen im Betrieb) oder unbekanntem Restfehler auftreten. Sie sind tlw. durch die Anlage des Experimentes oder bei der Auswertung kompensierbar und sollten, falls bekannt, angegeben werden.

ii. *Statistische Fehler* sind zufällig und unbeeinflussbar. Sie treten bei Messungen immer auf. Annahmen über die Verteilung der Messwerte erlauben eine Abschätzung der statistischen Fehler. In vielen Fällen sind die Messwerte $x_{(i)}$ mit $i = 1, 2, \dots, n$ um den Mittelwert $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_{(1)} + x_{(2)} + \dots + x_{(n)})$ normalverteilt. Die Standardabweichung ist dann ein Maß für den statistischen Fehler der Einzelmessungen. Der statistische Fehler des Mittelwertes ist um einen Faktor $1/\sqrt{n}$ kleiner als der Fehler der Einzelmessung und wird damit bei einer größeren Anzahl an Messwerten kleiner.

Die Unsicherheiten in den Messgrößen führen zu Unsicherheiten in dem Endergebnis, die Fehler pflanzen sich also fort. Siehe dazu auch das Lernblatt - Grundlagen der Fehlerfortpflanzung.

Weitere Informationen

- Orpheus-Seminar-Vortrag zum Experimentieren in der PhysikOlympiade (Stefan Petersen)
- Merkblatt Experimentieren (Maurice Zeuner) auf der Webseite des Orpheus-Vereins

- Lernblatt - Grundlagen der Fehlerfortpflanzung (Bastian Hacker)
- Zum Experimentieren in der Physik existieren zahlreiche Lehrbücher, z.B. Schenk, W. et al. (2013). *Physikalisches Praktikum* (14. Aufl.)