

Skripte zur Physik

Grundlagen der Mechanik

von

Christian Wyss

Skripte zur Physik

Grundlagen der Mechanik

von

Christian Wyss



mathema



© 2024 Dr. Christian Wyss

Verlagslabel: mathema (www.mathema.ch)

ISBN Hardcover: 978-3-384-22672-3

Paperback: 978-3-384-22671-6

Auflage 1.3

Druck und Distribution im Auftrag des Autors:

tredition GmbH, Heinz-Beusen-Stieg 5, 22926 Ahrensburg, Germany

Das Werk, einschliesslich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Für die Inhalte ist der Autor verantwortlich. Jede Verwertung ist ohne seine Zustimmung unzulässig. Die automatisierte Analyse des Werkes, um daraus Informationen, insbesondere über Muster, Trends und Korrelationen gemäss §44b UrhG („Text und Data Mining“) zu gewinnen, ist untersagt. Die Quellen der Bilder und deren Lizenzen sind im Anhang aufgeführt. Die Publikation und Verbreitung erfolgen im Auftrag des Autors, zu erreichen unter:

Dr. Christian Wyss, Chemin du Clos 60, 2502 Biel-Bienne, Schweiz.

Die Philosophie steht in diesem grossen Buch geschrieben, das unserem Blick ständig offen liegt – ich meine das Universum –; aber das Buch ist nicht zu verstehen, wenn man nicht zuvor die Sprache erlernt und sich mit den Buchstaben vertraut gemacht hat, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und deren Buchstaben sind Kreise, Dreiecke und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Bild davon zu verstehen; ohne diese irrt man in einem dunklen Labyrinth herum.

Galileo Galilei: „*Il Saggiatore*“ (1623)

Inhaltsverzeichnis

Einleitende Worte

Zu den Inhalten der Skripte

- I. Einheiten und Notation
- II. Einführung in die Kinematik
- III. Kräfte: Dynamik
- IV. Kräfte: Statik
- V. Kreisbewegung
- VI. Arbeit, Energie & Leistung

Ergänzende Bemerkungen

Demonstrationsexperimente

Schlussworte

Einleitende Worte

Die Skripte zur Physik sind im Rahmen des gymnasialen Unterrichts entstanden und sind primär als **unterrichtsbegleitendes Material** konzipiert. Sie können jedoch auch als eigenständiges Lern- und Übungsmaterial eingesetzt werden.

Die Skripte enthalten **Lückentexte**. Sie dienen der Festigung des erworbenen Wissens und sollten im Plenum mit der gesamten Klasse ausgefüllt werden. Diese handschriftlichen Einträge helfen, die Schlüsselbegriffe und Aussagen zu verinnerlichen und Herleitungen und Beweise besser nachzuvollziehen.

Zu den Inhalten

Einheiten und Notation

Behandelte Inhalte

Das vorliegende Skript behandelt die mechanischen Basiseinheiten (Meter, Sekunde und Kilogramm) und enthält zudem Übungen zum Umgang mit sehr grossen und sehr kleinen Zahlen in wissenschaftlicher Notation sowie unter Verwendung der SI-Präfixe.

Notwendiges Vorwissen

Es wird kein Vorwissen aus dem gymnasialen Curriculum vorausgesetzt.

Einführung in die Kinematik

Behandelte Inhalte

Das Skript zur Kinematik führt die Konzepte der Geschwindigkeit (momentane und durchschnittliche) sowie der Beschleunigung ein. Es wird sowohl die gleichförmige als auch die gleichmässig beschleunigte Bewegung aus dem Stillstand diskutiert. Viele angewandte Aufgaben dazu werden angeboten. Dabei wird auch der freie Fall behandelt. Zudem werden Weg-Zeit-, Geschwindigkeit-Zeit- und Beschleunigung-Zeit-Diagramme und die Zusammenhänge unter diesen studiert. Dies geschieht vor allem in Hinblick auf die Differential- und Integralrechnung, die später im Curriculum im Mathematikunterricht behandelt wird.

Notwendiges Vorwissen

Die Schülerinnen und Schüler sollten in der Lage sein, mit Einheiten umzugehen. Es wird kein weiteres Vorwissen aus dem gymnasialen Curriculum in Physik vorausgesetzt.

Kräfte: Dynamik

Behandelte Inhalte

In einem ersten Abschnitt wird die Dichte eingeführt. Anschliessend werden die Newtonschen Axiome über den Impuls und dessen Erhaltung motiviert. Die Wirkung der Kraft, insbesondere bei geradlinigen Bewegungen, wird diskutiert. Am Ende des Skripts wird zudem kurz auf die Kreisbewegung eingegangen.

Es werden die wichtigsten mechanischen Kräfte eingeführt, darunter die Gewichtskraft und die Gravitationskraft, die Federkraft, Zwangskräfte wie die Normalkraft und die Haftkraft, die Reibungskräfte und die Auftriebskraft.

Notwendiges Vorwissen

Es wird erwartet, dass die Kinematik behandelt wurde. Insbesondere sollten die Schülerinnen und Schüler mit den Begriffen Geschwindigkeit und Beschleunigung und mit der Beschreibung der gleichförmigen und der gleichmässig beschleunigten Bewegung vertraut sein.

Kräfte: Statik

Behandelte Inhalte

Da im Mathematikunterricht die Vektoren in der Regel noch nicht behandelt wurden, wird zuerst eine kurze Einführung zur Definition der Vektoren und deren Addition gegeben. Angewandte Probleme zur Kräfteaddition werden gelöst. Anschliessend wird das Konzept des „Kräftegleichgewichts“ bzw. der „Kräftefreiheit“ eingeführt und Aufgaben zur Statik gelöst. Insbesondere werden auch die Kräfte diskutiert, die auf einen Körper auf einer schiefen Ebene wirken.

Notwendiges Vorwissen

Die Inhalte des Skripts ‚*Kräfte: Dynamik*‘ müssen bekannt sein, insbesondere müssen das Aktionsprinzip und die Gewichtskraft, die Normalkraft, die Haftkraft und die Reibungskraft im Vorfeld behandelt worden sein.

Kreisbewegung

Behandelte Inhalte

Die beschriebenen Parameter der Kreisbewegung (Winkel, Periode und Frequenz) werden eingeführt. Die Winkel- und die Bahngeschwindigkeit werden diskutiert. Die Zentripetalkraft wird sowohl experimentell bestimmt als auch theoretisch hergeleitet. Eine Vielzahl angewandter Aufgaben dazu werden angeboten: darunter die Kräfte bei einer Kurvenfahrt und bei Satellitenbahnen und die Kräfte in Loops und auf Bodenwellen.

Notwendiges Vorwissen

Die Kinematik und die Dynamik müssen im Vorfeld behandelt worden sein.

Arbeit, Energie & Leistung

Behandelte Inhalte

Der Begriff der Arbeit wird eingeführt und zur Bestimmung der Hub-, Beschleunigungs-, Reibungs- und Deformationsarbeit angewandt. Die Eigenschaften des Kraft-Weg-Diagramms und der Einfluss des Winkels zwischen Kraft und Weg werden diskutiert. Die Energieerhaltung wird durch die vorherige Diskussion von einfachen Maschinen motiviert und zur Berechnung physikalischer Prozesse angewandt. Im letzten Teil werden die Leistung und der Wirkungsgrad von Maschinen behandelt, wobei die Einheiten Kilowattstunde (kWh) und Kalorie (cal) eingeführt werden.

Notwendiges Vorwissen

Die Kinematik und die Dynamik müssen im Vorfeld behandelt worden sein.

Einheiten & Notation



Wie die meisten Länder hat auch die Schweiz ein Amt für Messwesen. „Das Bundesamt für Metrologie METAS realisiert und vermittelt international abgestimmte und anerkannte Masseinheiten in der erforderlichen Genauigkeit. Es beaufsichtigt die Verwendung von Messmitteln in den Bereichen Handel, Verkehr, öffentliche Sicherheit, Gesundheit und Umwelt. METAS überwacht den Vollzug der gesetzlichen Bestimmungen durch die Kantone und die ermächtigten Eichstellen“. Das Bild zeigt den Türstein des ehemaligen Amtes für Gewicht und Masse in England.

1. Die Notation

Die Physik ist eine Naturwissenschaft, die grundlegende Phänomene der Natur untersucht, um deren Eigenschaften und Verhalten anhand von Modellen und Gesetzmässigkeiten zu erklären. Dabei werden Messungen durchgeführt und die Ergebnisse quantitativ ausgedrückt. Jemand hat eine Beobachtung gemacht und drückt sie wie folgt aus:

„Sie beträgt zweiundvierzigtausend.“

Dieser Satz ist unklar, da wir nicht wissen, von welcher Grösse gesprochen wird. Auf Nachfrage erfahren wir, dass es sich um die Strecke handelt, die bei einem Marathon gelaufen wird. Also:

„Die Strecke beträgt zweiundvierzigtausend.“

Nun wissen wir, dass es sich um eine Strecke handelt, aber handelt es sich um Yard, Meilen, Fuss, Zoll, Meter oder Kilometer? Wir formulieren besser:

„Die Strecke beträgt zweiundvierzigtausend Meter.“

Die Aussage ist nun eindeutig. Diese Schreibweise ist jedoch etwas schwerfällig. Wir kürzen die Notation deshalb in der Regel ab:

„Die Strecke beträgt zweiundvierzigtausend Meter.“

„Die Str. betr. zweiundvierzig Kilometer.“

„Die Str. betr. 2 + 40 Kilometer.“

„Die Str. betr. 42 Kilom.“

„Die Str. betr. 42 km“

„Die S. betr. 42 km“

„s betr. 42 km“

„s = 42 km“

In der Physik schreiben wir:

The diagram illustrates the components of the equation $s = 42 \text{ km}$ with handwritten labels and arrows:

- Grösse** points to s .
- Vorsatz** points to 42 .
- Einheit** points to km .
- Vergleichszeichen** points to $=$.
- Zahlenwert** points to 42 .

2. Basiseinheiten

Messen heisst, eine physikalische Grösse mit einer festgelegten Einheit zu vergleichen.

Die internationale Generalkonferenz für Mass und Gewicht, an der 100 Staaten teilnehmen, legt das SI-Einheiten-System (von frz.: *Système international d'unités*) fest. Das SI-System ist somit das weitest verbreitete Einheitensystem für physikalische Grössen. Auch die Schweiz ist an dieser Konferenz beteiligt und die SI-Einheiten gelten gemäss dem Bundesgesetz über das Messwesen gemäss dem „Metervertrag“ von 1875 auch in der Schweiz.

Das SI-System beruht auf sieben Basiseinheiten zu den entsprechenden Basisgrössen.

Die Basisgrössen der Mechanik und ihre Einheiten sind

die Strecke in Meter,
 die Zeit in Sekunden und
 die Masse in Kilogramm.

Die weiteren Basisgrössen und ihre Einheiten sind die Stromstärke in Ampère, die Temperatur in Kelvin, die Stoffmenge in Mol und die Lichtstärke in Candela.



Definition der SI-Einheiten

Bis 2018 hatte jede der sieben Basiseinheiten ihre eigene Definition der Form: „Die Basiseinheit X ist das Y-Fache von ...“. Von diesen Basiseinheiten wurden alle anderen Einheiten abgeleitet. Die Definitionen der Basiseinheiten wurden mit dem fortschreitenden Stand der Messtechnik sowie nach revidierten prinzipiellen Überlegungen mehrfach geändert. So wurde zum Beispiel der Meter ab 1889 anhand eines Prototyps („Urmeter“) und ab 1960 anhand einer speziellen Lichtwellenlänge definiert.

Seit 2019 werden die Basiseinheiten über physikalische Konstanten definiert. Damit wurde das Grundprinzip der Definition geändert: Seit der Reform lauten die Definitionen jeweils: „Die Konstante X hat den Zahlenwert Y, wenn man sie in SI-Einheiten ausdrückt.“

Es werden allen sieben Basiseinheiten eine Konstante mit definiertem Wert zugeschrieben. Zudem ist keine SI-Einheit mehr von veränderlichen Grössen oder einzigartigen Objekten (Urmeter, Kilogrammprototyp etc.) abhängig und die Realisierung ist frei wählbar.

Strahlung des Caesium-Atoms	$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9'192'631'770 \text{ Hz}$
Lichtgeschwindigkeit	$c = 299'792'458 \text{ m/s}$
Planck'sches Wirkungsquantum	$h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
Elementarladung	$e = 1.602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Boltzmann-Konstante	$k_{\text{B}} = 1.380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Avogadro-Konstante	$N_{\text{A}} = 6.02214076 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Photometrisches Strahlungsäquivalent	$K_{\text{cd}} = 683 \text{ lm/W}$

Die Zeit

Eine der wichtige physikalischen Grössen ist die Zeit oder die **Dauer** eines Vorgangs.

Name / Symbol	Einheit / Definition	Messgeräte
Zeit +	Die Basisgrösse heisst ...Sekunde... = ...S... Definition bis 1960: Dauer des 86'400-ten Teils des mittleren Sonnentages. Definition bis 1967: Der 31'556'925.9747-te Bruchteil des Jahres. Definition ab 1967: Eine Sekunde ist gleich der Dauer von 9'192'631'770 Schwingungen der Strahlung, die vom Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des ungestörten Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cäsium-133 ausgesendet wird.	Quarzuhr Sonnenuhr Sanduhr Pendeluhr



Atomuhren an der Physikalischen Technischen Bundesanstalt.

Prozess	Dauer
Rechenschritt eines PCs	$2 \cdot 10^{-10} \text{ s}$
Lebensdauer eines Myons	$2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$
Flügelschlag eines Kolibris	$1 \cdot 10^{-2} \text{ s}$
Ruhepuls	1 s
Dauer einer Schullektion	$2.7 \cdot 10^3 \text{ s}$
Leben eines Menschen	$2.5 \cdot 10^9 \text{ s}$
Alter der Menschheit	$6.3 \cdot 10^{13} \text{ s}$
Alter des Universums	$4.35 \cdot 10^{17} \text{ s}$

Einige typische Zeiten

Aufgabe 1: Wie viele Sekunden hat eine Minute, eine Stunde, ein Tag bzw. ein Jahr?

Aufgabe 2: Du hast einen sehr gut bezahlten Job bekommen – Du verdienst pro Sekunde einen Franken. Wie viele Jahre musst Du arbeiten, um 200 Milliarden Franken (sic!) – das geschätzte Vermögen von Elon Musk – zu verdienen?

Aufgabe 3: Wie lange würde es dauern, alle Moleküle in einem Liter Luft ($2.7 \cdot 10^{22}$ Moleküle) abzuzählen? Das Zählen stellt sich als nicht ganz einfach heraus und Du kannst im Schnitt ein Molekül pro Sekunde zählen. Gib das Ergebnis in Sekunden, Jahren und Weltalter (Alter des Universums, vgl. Tabelle) an.

Die Länge

Eine weitere wichtigste Basisgrösse ist die Strecke, der Weg bzw. der Ort.

Name / Symbol	Einheit / Definition	Messgeräte
Länge <u>s</u>	Die Basisgrösse heisst <u>Meter</u> = <u>m</u> Definition ab 1889: Der Abstand zweier Kerben in einem Stab bei 0°C, bestehend aus einer Platin-Iridium Legierung, welcher in Paris aufbewahrt wird, beträgt ein Meter (Urmeter). Definition ab 1983: Der Meter ist definiert als die Strecke, die das Licht im Vakuum in einer Zeit von $1/299\,792\,458$ Sekunden zurücklegt.	<u>Massstab</u> <u>Mess-</u> <u>schieber</u>



Kopie des Meterprototypen von 1875.

Gegenstand	Dimension
Ø Wasserstoffatom	$1.06 \cdot 10^{-10} \text{ m}$
Grösse von Bakterien	$10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}$
Grösse von Ameisen	0.003 m
Grösse des Menschen	$0.5 - 2 \text{ m}$
Höhe der Berge	$10^3 - 10^4 \text{ m}$
Durchmesser der Erde	$1.27 \cdot 10^7 \text{ m}$
Durchmesser der Sonne	$1.32 \cdot 10^9 \text{ m}$
Durchmesser Galaxie	$7.57 \cdot 10^{20} \text{ m}$

Einige typische Längen

Aufgabe 4: Welche Distanz legt das Licht in einer Sekunde zurück? Und wie viel in einem Jahr? Was misst die Masseinheit Lichtjahr LJ? Welcher Distanz entspricht ein Lichtjahr LJ?

Aufgabe 5: Ich persönlich kann mir gut merken, dass das Licht von der Sonne bis zur Erde etwa 8.5 Minuten braucht. Wie weit ist die Sonne also von der Erde entfernt? Diese Distanz nennt man Astronomische Einheit AE.

Aufgabe 6: Der Urmeter hat einen X-förmigen Querschnitt, besteht aus einem sehr besonderen Material und gilt genau bei 0°C. Was könnten Gründe für

- a) die Form des Urmeters sein, b) die Wahl des Materials sein,
- c) die Angabe der Temperatur sein und für d) die Wahl von gerade 0°C sein?

Aufgabe 7: Wie lange dauert ein Lichtjahr?

Aufgabe 8: Lange Zeit gab es sehr viele Längenmasse: Finger, Zoll, Hand, Fuss, Spanne, Elle, Schritt, Faden, Tagesreise und viele mehr. Diese waren auch noch lokal unterschiedlich. So gab es eine Berner, eine Luzerner, eine Zuger, eine alte und eine neue hallische, eine kurze und eine lange Hamburger Elle. Auf den Marktplätzen waren die lokalgültigen Masse häufig öffentlich aufgehängt. Auch nicht jedes Gewerbe brauchte dieselben Masse: Die Tuchmacher- und die Schuhmacher-Elle waren nicht gleich lang.

- An was orientierten sich viele dieser alten Einheiten?
- Eine Berner Elle beträgt 54.17 cm. Wie viele Berner Ellen sind eine Zuger Elle (61.04 cm) und eine Luzerner Elle (49.8 cm)?



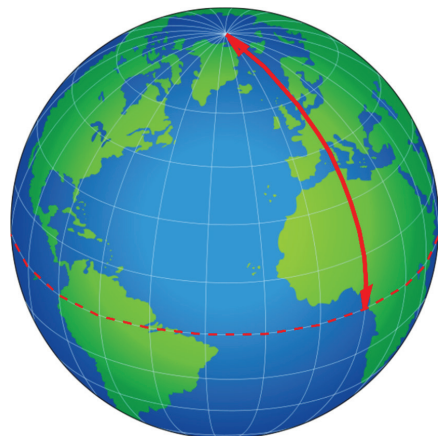
Rechts vom Riesentor am Stephansdom in der Wiener Innenstadt befinden sich seit etwa 1450 zwei längliche Metallstäbe. Hierbei handelt es sich um die ältesten erhaltenen Massstäbe Österreichs und sie repräsentieren als Kontrollmöglichkeit für Händler und Käufer die sogenannte Wiener Tuch- und die Leinenelle. Der kürzere Stab, die Wiener Tuchelle, misst 776 mm, der längere, die Leinenelle, 896 mm.

Aufgabe 9: Das anglo-amerikanische Masssystem enthält noch viele dieser alten Ausdrücke. In England und den Vereinigten Staaten gibt es die Einheiten inch (Zoll), foot (Fuss, 12 inch), yard (Schritt, 3 foot) und mile (Landmeile, 1760 yard). Das System ist über das SI-Einheiten-System definiert. Ein inch ist per Definition 2.54 cm. Berechne die Länge einer Landmeile.

Aufgabe 10: Der Abt Jean Picard schlug im Jahr 1668 vor, als Definition des Meters die Länge des Sekundenpendels zu nehmen. Ein Meter wäre also die Länge eines Pendels, das genau eine Sekunde für eine Halbschwingung braucht. Welche Vor- bzw. Nachteile hat eine solche Definition gegenüber der Definition mithilfe des Urmeters? Welche Vor- und Nachteile hat die moderne Definition?

Aufgabe 11: Die Pariser Akademie der Wissenschaften entsandte im Jahre 1735 Expeditionen nach Lappland und Peru, um die genaue Grösse der Erde zu vermessen. 1793 wurde dann der Meter als der 10-Millionste Teil des Abstands vom Äquator zum Pol festgelegt. Der Radius der Erde beträgt (im Mittel) 6'371 km. Wie lang ist ein Meter gemäss dieser Definition?

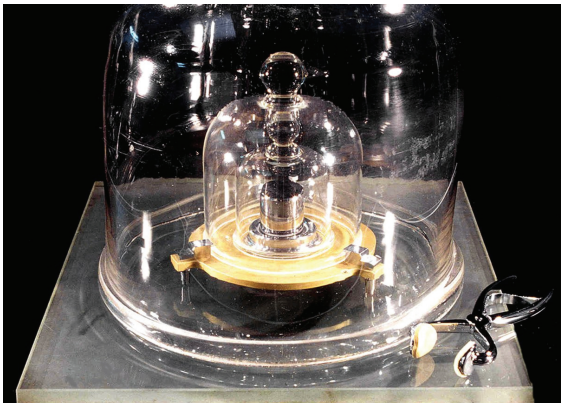
Aufgabe 12: Die heute noch gebrauchte Seemeile ist ähnlich festgelegt. Eine Seemeile ist als die Länge einer Winkelminute auf einem Längengrad festgelegt. Wie lang ist also eine Seemeile? Weshalb ist diese Festlegung praktisch?



Die Masse

Die Masse ist eine Mass für die Menge eines Stoffes.

Name / Symbol	Einheit / Definition	Messgeräte
Masse m	Die Basisgrösse heisst $\text{Kilogramm} = \text{kg}$ Definition bis 1889: Ein Kilogramm ist die Masse eines Liters (1 dm^3) Wassers. Definition ab 1889: Das Kilogramm ist gleich der Masse des internationalen Kilogramm-prototyps in Paris. Definition ab 2019: Das Kilogramm ist definiert, indem für die Planck-Konstante h der Wert $6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$ festgelegt wird.	Balken- waage Küchen- waage



Internationaler Kilogrammprototyp in Paris

Körper	Masse
Elektron	$9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Proton	$1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Bleiatom	$3.4 \cdot 10^{-25} \text{ kg}$
Kleine Insekten	$10^{-4} - 10^{-3} \text{ kg}$
Mensch	$50 - 100 \text{ kg}$
Cheopspyramide	10^{10} kg
Erde	$6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Milchstrasse	$3.6 \cdot 10^{41} \text{ kg}$

Einige typische Massen

Aufgabe 13: Welche Masse hat das Wasser in einer Badewanne (1.8 m lang, 45 cm breit und 40 cm tief)?

Aufgabe 14: Unsere Sonne hat eine Masse von etwa $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$. Wie viele Sonnen gibt es in unserer Galaxie (Milchstrasse, vgl. Tabelle) also etwa?

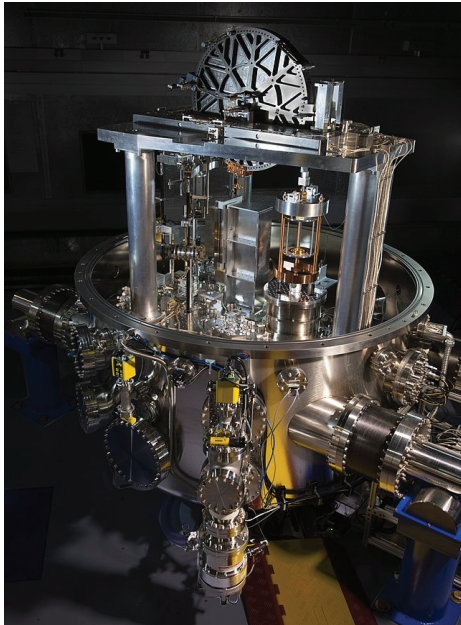
Aufgabe 15: Ein Sperling (Spatz) wiegt ca. 35 Gramm. Wie viel Mal schwerer ist ein Mensch als ein Sperling?

Aufgabe 16: Ein Atom besteht aus Protonen und Elektronen. Das Wasserstoffatom hat genau ein Proton im Kern und ein Elektron in der Hülle. Wie viel schwerer ist ein Proton als ein Elektron? Vergleiche das Resultat mit dem Resultat der vorangehenden Aufgabe.

Realisierung des Kilogramms

Es werden zur Zeit zwei Methoden zur Realisierung des Kilogramms vorgeschlagen:

Die Watt-Waage



Die Watt-Waage vergleicht elektrische und mechanische Leistung. Es handelt sich dabei um einen hoch komplexen messtechnischen Aufbau. Das Eidgenössische Institut für Metrologie METAS betreibt eine solche Waage zur Definition des Kilogramms.

Die XRCD-Methode



Bei der XRCD-Methode (englisch X-Ray Crystal Density) wird mit Hilfe von Röntgenbeugung an einem Silizium-Einkristall die Anzahl Atome in einer Kugel bestimmt und so das Kilogramm festgelegt. Dazu werden die perfektesten Kugeln der Welt hergestellt ($r \approx 50 \text{ mm} \pm 25 \text{ nm}$).