

POCKET TEACHER

Abi

KOMPAKTWISSEN OBERSTUFE

Physik

Abi

Cornelsen

SCRIPTOR

Fahrplan zum Abi

Noch 2 Jahre bis zum Abitur

Fächer- bzw. Kurswahl abklären

Beratung durch Oberstufenbetreuer · Gegengewichte zum Lernstress schaffen

Zeitplan erstellen

Klausuren, Prüfungen, ggf. schriftliche Facharbeit · Projekte, Präsentationen · Lernzeiten am Nachmittag festlegen · Ferien, Pausen, Freizeitaktivitäten planen

Ablage einrichten

Schreibtisch: für jedes Fach eine getrennte Ablage · Ordnerstruktur im Computer · Internetlinkliste

Lernorte klären

Arbeitsplatz: zu Hause? Schule? Bibliothek?

Lerngemeinschaften organisieren

Unterschiedliche Lerntypen ergänzen sich!

Lernstrategie entwickeln

Persönliche Stärken-/Schwächenanalyse, evtl. mithilfe von Fachlehrern, erstellen · Hindernisse benennen und Strategien zur Überwindung erproben

Noch 1½ Jahre bis zum Abitur

Zeitpläne kritisch überprüfen

Wöchentlich: Lernzeiten, Pausen ·

Monatlich: Stoffverteilung, Wiederholung, Lerngruppentermine · Klausur- und Referatstermine

Ggf. Facharbeit planen und durchführen

Fach festlegen · Thema suchen und bearbeiten

Lernhilfen und Lernmaterial organisieren

Nachschlagewerke und Trainingsbücher Abiturwissen · Unterrichtsmitschriften · Abiturvorbereitungskurse

Zu Beginn des Abiturschuljahres

Zeitplan anpassen

Alle Abiturtermine notieren · Lernzeiten: Wiederholung strukturieren, Schwerpunkte setzen · ggf. Präsentationsprüfung planen und sich mit allen Themen befassen · Freizeit von Arbeitszeit trennen

Motivation tanken

Lern- oder Arbeitstagebuch auswerten · Mut-mach-Gespräche in Lerngruppe, mit Eltern und Freunden führen · Antistresstraining · Belohnung nach dem Abistress planen: Abschlussfeier, Reise u. Ä.

Blocklernen

Klausuren der Vorjahre durcharbeiten · Prüfungssimulation (mit Zeitbegrenzung)

Notenverbesserung nach dem schriftlichen Abi

Evtl. Teilnahme an einer freiwilligen mündlichen Prüfung

Nach dem letzten Halbjahreszeugnis

Zeitplan anpassen

Lernzeiten anpassen · Wiederholungsschritte planen · Klausur- und Referatstermine im Blick behalten · Facharbeits-/Seminararbeitstermine einhalten

Lernfortschritte dokumentieren

Stärken-/Schwächenanalyse anhand alter Klausuren durchführen und konkrete Konsequenzen daraus ableiten · Lerntagebuch führen

Motivationsarbeit verstärken

Gespräche mit Prüflingen des Vorjahrs führen · Beratungsgespräch mit Oberstufenbetreuer/Fachlehrkräften führen · Ziele fest ins Auge fassen · regelmäßige Arbeit mit dem Lern- oder Arbeitstagebuch

Berufs-/Studienentscheidung vorbereiten

Studienführer organisieren · Gespräche mit Studien-/Berufsanfängern · Agentur für Arbeit: Beratungstermine wahrnehmen · Abiturmessen besuchen · Tag der offenen Tür in Universitäten nutzen

Blocklernen

Abiturvorbereitungskurs · Lernwochenende(n) mit Lerngruppe · Prüfungsaufgaben des Vorjahrs beschaffen und damit üben

Hans-Peter Götz

Physik

5., aktualisierte Auflage

POCKET TEACHER ABI

Cornelsen
SCRIPTOR

Inhalt

Vorwort	7
1 Mechanik des Massenpunkts	9
1.1 Bewegung ohne Einwirkung einer Kraft	9
1.2 Bewegungen unter der Einwirkung von Kräften	12
Wenn die Kraft weder ihren Betrag noch ihre Richtung ändert	13
Wenn Kräfte von konstantem Betrag einwirken und ihre Richtung stets rechtwinklig zur augenblicklichen Bewegungsrichtung ist	25
1.3 Erhaltungssätze der Mechanik	34
Energieerhaltung	34
Impulserhaltung	41
2 Thermodynamik	45
2.1 Die Gasgesetze	47
Das Gasthermometer, absolute Temperatur	48
2.2 Thermische Energie, innere Energie	53
2.3 Die Hauptsätze der Wärmelehre	55
2.4 Die Strahlungsgesetze	62
3 Mechanische Schwingungen und Wellen	70
3.1 Schwingungen	70
Charakteristische Größen zur Beschreibung einer Schwingung	70
Die harmonische Schwingung	72
Physikalische Bedingungen für eine harmonische Schwingung	75

3.2 Mechanische Wellen	80
Das Überlagerungsprinzip bei Wellen, Interferenz	83
Reflexion von Wellen, stehende Wellen	86
Brechung und Beugung von Wellen	89
4 Elektrizitätslehre	91
4.1 Die Ursache elektrischer Erscheinungen:	
Ladungen	91
Die Eigenschaften ruhender elektrischer Ladungen (Elektrostatik)	93
Das elektrische Feld	95
Die elektrische Spannung	98
Der Kondensator	100
4.2 Magnetische und elektrische Felder	104
Das Magnetfeld von Strömen	104
Die magnetische Kraft auf Ströme	106
4.3 Bewegungen geladener, freier Teilchen in Feldern	110
Bewegungen in elektrischen Feldern	110
Bewegungen in magnetischen Feldern	114
Die Messung von Ladung und Masse bei Ionen	116
4.4 Elektromagnetische Induktion	120
Das Induktionsgesetz	120
Die Selbstinduktion	127
4.5 Wechselstrom	132
Der Transformator	132
Größen in Wechselstromkreisen	136
Effektivwerte von Wechselspannungen und Wechselströmen	138
Induktive und kapazitive Widerstände	140

5 Elektromagnetische Schwingungen und Wellen	147
5.1 Wie Wellen entstehen	147
5.2 Schwingungserreger für elektrische Ladungen	150
6 Wellentheorie des Lichts	157
6.1 Historische Vorstellungen von der Natur des Lichts	157
6.2 Die ersten Wellenvorstellungen für Licht	160
6.3 Interferenzerscheinungen bei Licht	165
Das optische Gitter	169
7 Die Photonentheorie des Lichts, Wahrscheinlichkeitswellen	180
7.1 Lichtquanten	180
Der äußere Fotoeffekt	180
Weitere Lichteffekte, die mit einer Photonentheorie gedeutet werden können	187
Die kurzweilige Grenze der Röntgenbremsstrahlung	189
7.2 Elektronenwellen, Wahrscheinlichkeitswellen	193
8 Atomphysik	197
8.1 Historische Atommodelle	198
Das Atommodell von RUTHERFORD	198
Das Atommodell von BOHR	200
Der FRANCK-HERTZ-Versuch	202
8.2 Das Orbitalmodell	205
8.3 Die Schrödingergleichung	207
PAULI-Prinzip und Schalenmodell	208

9 Kurze Einblicke in die Physik des 20./21. Jahrhunderts	210
9.1 Relativitätstheorie	211
Zeitdilatation: Bewegte Uhren gehen langsamer	214
Längenkontraktion: Die Länge einer bewegten Strecke erscheint verkürzt	216
Relativistische Masse, Masse-Energie-Äquivalenz	217
9.2 Kernphysik	221
Radioaktivität	221
Kernzerfall	226
Gefahren der Kernstrahlung	231
Energie aus Kernspaltung, Kernfusion	234
9.3 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	239
Wechselwirkungen und Austauschteilchen	240
 10 Größen und Einheiten	242
10.1 Mechanik	242
10.2 Thermodynamik, Wärmelehre	244
10.3 Schwingungen und Wellen	245
10.4 Elektrizitätslehre	245
10.5 Wellenlehre des Lichts	248
10.6 Photonentheorie des Lichts	248
10.7 Spezielle Relativitätstheorie (SRT)	249
10.8 Naturkonstanten	251
 Stichwortverzeichnis	252

Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser!

Der POCKET TEACHER ABI Physik eignet sich als Wegbegleiter durch die gesamte Oberstufe bis zum Abitur. Er hilft nicht nur beim Endspurt vor dem Abitur, sondern ebenso gut bei Hausaufgaben und Referaten oder bei der Vorbereitung von Klausuren und Tests. Selbst wer glaubt, schon fit zu sein, kann hier mit Gewinn noch einmal ein Kapitel querlesen und sein Wissen auffrischen. Vor allem aber werden die Zusammenhänge übersichtlich und anschaulich präsentiert. Dazu tragen auch die zahlreichen Grafiken und Schaubilder bei.

Gewünschte Infos können am schnellsten über das Stichwortverzeichnis am Ende des Bandes gefunden werden. Am besten ins Inhaltsverzeichnis schauen und im entsprechenden Kapitel nach dem Begriff suchen! Stichwörter sind hier durch Fettdruck hervorgehoben (z. B. *Wirkungsgrad*, S. 41). Farbige Pfeile ➤ weisen auf andere Stellen im Buch zum gleichen Thema.

BEISPIEL Bewegungsenergie (➤ S. 35)

Geht man den Pfeilen nach, bekommt man zu diesen Fachbegriffen weitere Informationen.

- Mehrere Beispielaufgaben oder Aufzählungen zu einem Thema sind meist durch kleine farbige Quadrate übersichtlich gegliedert (➤ S. 49).

Wichtige, wesentliche Informationen sind besonders hervorgehoben:

► **ANMERKUNGEN** (➤ S. 37)

Auch die folgenden Hervorhebungen verdienen Ihre besondere Aufmerksamkeit:

MERKE

In diesen Kästen wird in konzentrierter Form Grundsatzwissen vermittelt

ACHTUNG

Hiermit wird auf besondere Aspekte wie leichte Verwechslungen u. Ä. hingewiesen.

BEACHTEN

(↗ S. 37)

Diese Rubrik kennzeichnet Merksätze und Definitionen (↗ S. 59).

Mechanik des Massenpunkts

Die Mechanik beschreibt den Ablauf verschiedenartiger Bewegungen von Körpern (Kinematik) und stellt Fragen nach der Ursache von Bewegungen (Dynamik). Die Erfahrung zeigt, dass es für die Beantwortung vieler Fragen genügt, den Körper, der sich relativ zu einem ruhenden Beobachter bewegt, als „punktförmig“ zu betrachten. In dieser *Punktmechanik* spielt die wirkliche Gestalt des Körpers keine Rolle; man rechnet so, als ob die ganze Masse in seinem Schwerpunkt konzentriert wäre. In dieser Modellvorstellung greifen alle äußeren Kräfte am Schwerpunkt des Körpers an. Verformungen der Körper und Drehbewegungen um Achsen des Körpers treten in diesem Teil der Mechanik nicht auf; Begriffe und Größen wie Drehmasse (= Trägheitsmoment), Drehimpuls, Rotationsenergie ... fehlen deshalb in diesem Band. Je nachdem, ob und in welcher Richtung eine Kraft (oder mehrere Kräfte) auf einen Körper der Masse m einwirkt, unterscheidet man verschiedene Bewegungsarten.

1.1 Bewegung ohne Einwirkung einer Kraft

Die geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit

In diesem Fall gilt das *Trägheitsprinzip*: Aufgrund seiner Masse (= Trägheit, *Beharrungsvermögen*) ist jeder Körper „von sich aus“ bestrebt, seinen augenblicklichen Bewegungszustand beizubehalten. Ist er momentan in Ruhe, so wird er in diesem Zustand verharren, wenn ihn nicht Kräfte zwingen, dies zu ändern. Aber auch ein schon bewegter Körper behält seine Bewegung bei – selbst ohne weitere Antriebskraft.

Ein kräftefreier Körper bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit längs einer Geraden; diese einfachste Bewegungsart wird auch als *gleichförmige Bewegung* bezeichnet.

Der Quotient aus der Streckenlänge Δs , die ein Körper während der Zeitspanne Δt zurücklegt, und dieser Zeitspanne, wird als Geschwindigkeit bezeichnet:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

und in den Einheiten $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ oder $\frac{\text{km}}{\text{h}}$ angegeben. Es ist $1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$; $1 \frac{\text{km}}{\text{h}} \approx 0,28 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

(mittlere) Geschwindigkeit: $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Da bei der *gleichförmigen Bewegung* die Geschwindigkeit konstant ist, spielt es keine Rolle, wie groß oder wie klein die Wegstücke Δs gewählt werden. Für diese Bewegung gilt daher auch $v = \frac{s}{t}$ oder $s = v \cdot t$, wo s den in der Zeit t zurückgelegten Gesamtweg bezeichnet.

BEISPIEL Fährt ein Auto vom Ort A in $\Delta t = 30 \text{ min}$ in den $\Delta s = 9 \text{ km}$ entfernten Ort B, so beträgt seine *mittlere*

$$\text{Geschwindigkeit } v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{9000 \text{ m}}{1800 \text{ s}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

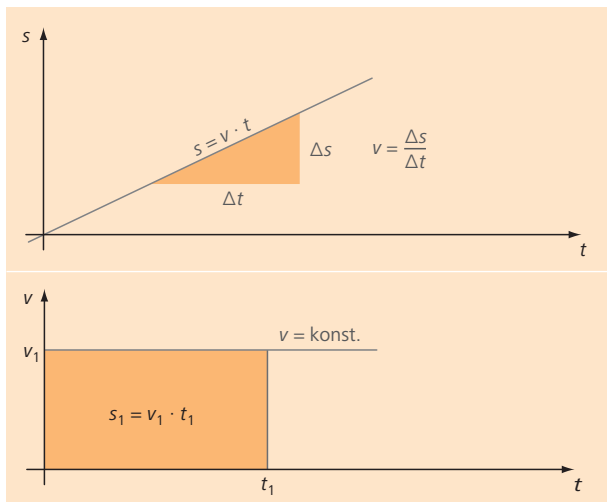
Nehmen wir an, dass dieses Auto stets mit der konstanten Geschwindigkeit $v = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ fahre (was in Wirklichkeit sicher nicht längere Zeit einzuhalten ist), so bewegt es sich gleichförmig und legt beispielsweise in $t = 5$ Stunden Fahrzeit den Gesamtweg $s = v \cdot t = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 18\,000 \text{ s} = 90\,000 \text{ m} = 90 \text{ km}$ zurück.

► **ANMERKUNG** Selbstverständlich benötigt das Auto für sein Fortkommen eine ständig einwirkende Kraft. Der Motor übt über das Getriebe und die Räder eine Kraft auf die Straße aus; die Gegenkraft dazu treibt das Auto vorwärts. Im Fall einer gleichförmigen Bewegung ist der Betrag dieser Kraft exakt gleich

der Summe aller Reibungskräfte, die das Auto von der Straße und der Luft erfährt. Da die Reibungskräfte der Antriebskraft entgegengerichtet sind, „kompensieren“ sich die Kräfte und die Physiker bezeichnen auch diesen Zustand als „kräftefrei“.

Trägt man den zurückgelegten Weg s und die Zeit t in ein Schaubild ein, so ergibt sich – wenn zum Zeitpunkt $t = 0$ auch der Weg $s = 0$ ist – eine Ursprungsgerade. Sie beschreibt das *Weg-Zeit-Gesetz* der gleichförmigen Bewegung. Die Steigung ist ein Maß für die Geschwindigkeit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$. In das gleiche Schaubild eingetragen, gehört zu einem schnelleren Fahrzeug eine steilere Gerade.

1



Trägt man in ein weiteres Schaubild die Geschwindigkeit v und die Zeit t ein, so erhält man eine Parallele zur t -Achse: $v = \text{konst.}$ Diese Gerade beschreibt das *Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz*. Der

Flächeninhalt unter dem Schaubild (in diesem Fall ein Rechteck) ist ein Maß für den zurückgelegten Weg.

Bewegungsgesetze der gleichförmigen Bewegung:

Weg-Zeit-Gesetz: $s = v \cdot t$

bzw. $s = v \cdot t + s_0$, wenn zum Zeitpunkt $t = 0$ bereits ein Wegvorsprung s_0 besteht.

Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz: $v = \text{konst.}$

1.2 Bewegungen unter der Einwirkung von Kräften

Wirkt auf einen (frei beweglichen) Körper eine Kraft ein, so ändert er seinen Bewegungszustand je nach *Betrag* und *Richtung* der Kraft:

- Seine Geschwindigkeit kann zu- oder abnehmen, man sagt: Der Körper wird beschleunigt oder abgebremst.
- Er kann aber auch lediglich seine Bewegungsrichtung ändern und den Betrag der Geschwindigkeit beibehalten.
- Sowohl der Betrag der Geschwindigkeit als auch seine Bewegungsrichtung können sich ändern.

BEISPIELE

- Ein 100-m-Läufer beschleunigt auf den ersten 20 m der Strecke nach dem Start. Die Muskeln seiner Beine üben dabei große Kräfte auf die Bahn aus; die Gegenkraft dazu erteilt ihm die Beschleunigung. Auf den restlichen 80 m versuchen die Sprinter, die nach der Beschleunigungsphase erreichte Höchstgeschwindigkeit beizubehalten. Zu dieser eher gleichförmigen Bewegung ist weniger Krafteinsatz erforderlich, lediglich die Reibungskräfte müssen kompensiert werden.
- Die Erde übt auf den Mond eine ständig einwirkende Kraft aus. Diese Kraft führt dazu, dass der Mond fortwährend zu einer Richtungsänderung gezwungen wird. Anstatt aufgrund

seiner Trägheit geradlinig fortzufliegen, wird er durch die Anziehungskraft der Erde auf eine Kreisbahn genötigt. Da die Krafrichtung immer rechtwinklig zur Bewegungsrichtung einwirkt, ändert diese Kraft den Betrag seiner Geschwindigkeit nicht!

- Wirft man einen Ball seinem Mitspieler zu, so wirkt auch während des freien Flugs die Gewichtskraft auf den Ball ein. Sie bewirkt, dass der Ball auf einer gekrümmten Bahn (einem Parabelbogenstück) fliegt, also ständig seine Richtung ändert, und gleichzeitig, dass sich der Betrag der Geschwindigkeit ändert.

1

Kräfte, Wege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen besitzen eine Richtung im Raum. Solche gerichteten Größen – im Gegensatz zu Größen, denen man keine Richtung zuordnen kann, wie beispielsweise der Masse m – werden in der Physik als *vektorielle Größen* bezeichnet und erhalten zur Kennzeichnung einen Pfeil über das Größensymbol: \vec{F} , \vec{s} , \vec{v} , \vec{a} ...

In den Fällen, wo es auf die Richtung nicht ankommt, oder wo diese aus der Anschauung her klar ist, verzichtet man häufig auf diese umständliche Schreibweise und versteht unter F , s , v , a ... (ohne Pfeil darüber) die Beträge dieser Größen. In diesem Band verwenden wir nur in Ausnahmefällen die vektorielle Schreibweise.

Wenn die Kraft weder ihren Betrag noch ihre Richtung ändert

Die gleichmäßig beschleunigte Bewegung

Ist ein Körper zuvor in Ruhe oder bereits in Bewegung und wirkt dann eine Kraft parallel zur Bewegungsrichtung ein, so wird der Körper beschleunigt oder – wenn die Kraft entgegenwirkt – abgebremst.

Diesen Sachverhalt kennen wir aus typischen Alltagssituationen: Bei der Anfahrbewegung eines Autos nimmt seine Geschwindigkeit ständig zu. Man meint damit, dass seine Momentangeschwindigkeit wächst.

Unter der *Momentangeschwindigkeit* versteht man den Grenzwert der Durchschnittsgeschwindigkeit $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ für „unendlich“ kleine Zeitspannen Δt ($\Delta t \rightarrow 0$).

So versucht z. B. die Polizei bei einer Geschwindigkeitskontrolle mit der Lichtschranken-Methode möglichst genau die Momentangeschwindigkeit zu ermitteln, indem sie die Messstrecke Δs sehr klein wählt und damit kleine Zeitspannen Δt misst.

Sind der Betrag und die Richtung der beschleunigenden Kraft konstant, so nimmt die Geschwindigkeit in gleichen Zeitspannen Δt jeweils um den gleichen Betrag Δv zu (oder ab). Diese ebenfalls geradlinig verlaufende Bewegung wird als *gleichmäßig beschleunigte* (bzw. gleichmäßig verzögerte) *Bewegung* bezeichnet. Unter der Beschleunigung (bzw. Verzögerung) a versteht man den Quotienten $\frac{\Delta v}{\Delta t}$ aus einer Geschwindigkeitsänderung Δv und der Zeitspanne Δt , in der diese stattfindet:

$$\text{Beschleunigung: } a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

(Vereinbart man, dass jede Änderung mit dem Δ -Zeichen als Differenz „neuer Wert minus altem Wert“ berechnet wird, so können negative Beschleunigungen auftreten; in diesem Fall wird der Betrag $|a|$ auch als Verzögerung bezeichnet.)

Beschleunigungen und Verzögerungen werden üblicherweise in der Einheit $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ gemessen.

BEISPIEL Beschleunigt ein Fahrzeug beim Anfahren aus dem Stand mit einer konstanten Beschleunigung $a = 3,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, so beträgt seine Momentangeschwindigkeit nach der 1. Sekunde $v_1 = 3,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$,

nach der 2. Sekunde $v_2 = 6,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, nach der 3. Sekunde $v_3 = 9,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ usw.

Wirkt auf einen frei beweglichen Körper der Masse m eine konstante Kraft F ein, so erfährt er die konstante Beschleunigung:

$$a = \frac{F}{m} \text{ in Richtung der Kraft.}$$

1

Diese Ursache und Wirkung verknüpfende Beziehung wird als *NEWTON'sches Grundgesetz der Mechanik* bezeichnet:

$$a = \frac{F}{m} \text{ bzw. } F = m \cdot a.$$

BEISPIEL Soll ein Auto der Masse $m = 1200 \text{ kg}$ mit $a = 4,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ beschleunigen, so muss der Motor hierfür die Kraft:

$$F = m \cdot a = 1200 \text{ kg} \cdot 4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4800 \text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 4800 \text{ N aufbringen.}$$

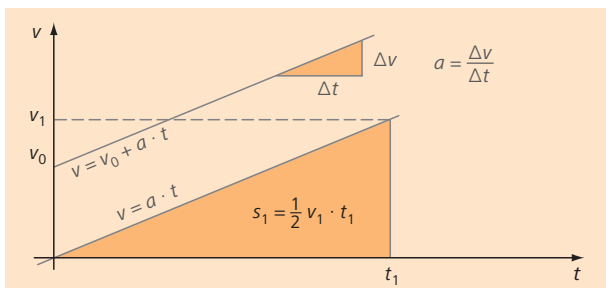
Für die gleiche Beschleunigung eines Lkw mit $m = 12000 \text{ kg}$ Masse muss der Motor eine Kraft von 48000 N aufbringen. Ist seine Kraft jedoch weiterhin auf 4800 N begrenzt, so ist die maximal erreichbare Beschleunigung des Lkw:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{4800 \text{ N}}{12000 \text{ kg}} = 0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}^2},$$

d.h., seine Momentangeschwindigkeit beim Startvorgang beträgt nach 1 Sekunde $0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, nach 2 Sekunden $0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, nach 3 Sekunden $1,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ usw.

Bei der gleichmäßig beschleunigten Bewegung ist das $v(t)$ -Schaubild eine Ursprungsgerade, wenn zum Zeitpunkt $t = 0$ die Bewegung beginnt, oder eine „verschobene Gerade“, wenn aus einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 heraus beschleunigt wird („fliegender Start“). In jedem Fall ist die Steigung ein Maß für die

Beschleunigung $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ und der Flächeninhalt unter dem Schaubild ein Maß für den zurückgelegten Weg. Geschwindigkeits-Zeit-Schaubilder werden auch als Tachogramme bezeichnet.



Die zugehörigen Geschwindigkeits-Zeit-Gesetze können direkt dem Diagramm entnommen werden (bei gleichmäßig verzögerten Bewegungen sind die Pluszeichen durch Minuszeichen zu ersetzen).

Bewegungsgesetze der gleichmäßig beschleunigten Bewegung:

Weg-Zeit-Gesetze: $s = \frac{1}{2} v \cdot t = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ bzw. $s = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cdot t^2$

Geschwindigkeits-Zeit-Gesetze: $v = a \cdot t$ bzw. $v = v_0 + a \cdot t$

Alle im Vakuum fallenden Körper (*freier Fall*) erfahren durch die einwirkende Gewichtskraft F_G dieselbe konstante Beschleunigung

$a = \frac{F_G}{m} = \frac{m \cdot g}{m} = g$. (In der Mittelstufe wird

$g = 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ als Ortsfaktor bezeichnet.)

BEISPIEL Ein frei fallender Stein fällt (ohne Luftwiderstand) in einen 80 m tiefen Brunnenschacht.

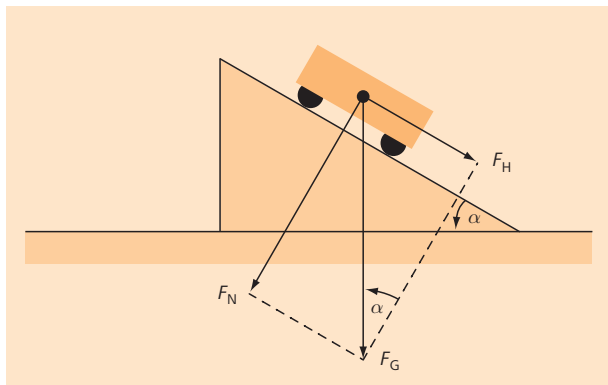
Aus dem Weg-Zeit-Gesetz $s = \frac{1}{2} a \cdot t^2$ folgt mit $a = g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ für die Fallzeit $t = \sqrt{\frac{2s}{g}} \approx 4 \text{ s}$. Für die Endgeschwindigkeit

liefert das Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz dann: $v = a \cdot t = g \cdot t \approx 40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Auch Gleit- oder Rollbewegungen auf einer geneigten Fahrbahn verlaufen gleichmäßig beschleunigt. Die parallel zur Bahn gerichtete Komponente der Gewichtskraft $F_H = F_G \cdot \sin \alpha$ liefert eine konstant beschleunigende Kraft. F_H wird als **Hangabtriebskraft** bezeichnet.

Diese hierzu rechtwinklig orientierte 2. Komponente der Gewichtskraft – auch als **Normalkraft** bezeichnet – bewirkt ein „Anpressen“ des Körpers auf die Unterlage. Diese Normalkomponente $F_N = F_G \cdot \cos \alpha$ ist – neben der Oberflächenbeschaffenheit – wesentlich für die mechanischen Reibungskräfte zwischen zwei gleitenden Körpern verantwortlich. (Auf einer horizontalen Ebene ist $F_N = F_G$.)

1



Für die Reibung eines gleitenden Körpers auf einer trockenen Unterlage zeigen Experimente, dass die **Reibungskraft** F_R weitgehend unabhängig von der Geschwindigkeit und der Größe der reibenden Flächen ist. Mit dem experimentell bestimmten Quotienten $\frac{F_R}{F_N} = f$ (eine benennungslose Zahl!) wird die Oberflächenbeschaffenheit der Gleitflächen charakterisiert; f wird als Reibzahl bezeichnet.

Kennt man die Reibzahl f (hierfür gibt es Tabellen in Büchern), so liefert $F_R = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$ eine (gute) Näherung zur Berechnung der Reibungskraft.

BEISPIEL Ein Holzklotz der Masse $m = 0,50 \text{ kg}$ wird auf eine um $\beta = 60^\circ$ abwärts geneigte Glasplatte gesetzt und dann losgelassen. Würde der Klotz auf der Glasfläche keine Reibung erfahren, so würde ihm die Hangabtriebskraft:

$$F_H = m \cdot g \cdot \sin \alpha = 0,50 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \sin 30^\circ = 2,45 \text{ N}$$

eine konstante Beschleunigung $a = \frac{F_H}{m} = 4,9 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ erteilen.

Für die Gleitreibzahl bei Holz auf Glas findet man in Tabellen den Wert $f = 0,4$. Die Gleitreibungskraft beträgt:

$$F_R = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha = 0,4 \cdot 0,5 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \cos 30^\circ \approx 1,7 \text{ N}.$$

Dadurch verringert sich die Beschleunigung auf den Wert:

$$a = \frac{(F_H - F_R)}{m} = \frac{0,75 \text{ N}}{0,5 \text{ kg}} = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

► **ANMERKUNG** Bei der Berechnung der Beschleunigung kürzt sich die Masse des Körpers heraus, d. h., die oben berechneten Beschleunigungswerte gelten für beliebig schwere Körper.

Soll ein zunächst ruhender Körper, der auf einer Unterlage aufsitzt, verschoben werden, so setzt er sich in der Regel erst in Bewegung, wenn die an ihm angreifende Kraft einen bestimmten Betrag übersteigt. Bevor eine Beschleunigung einsetzt, wirkt der von außen angreifenden Kraft die sogenannte **Haftreibungskraft** entgegen; der Körper ist so lange im Kräftegleichgewicht. Es zeigt sich, dass die *maximale* Haftreibungskraft in den meisten Fällen größer ist als die Gleitreibungskraft. Ist die Haftreibung einmal „überwunden“, genügt in der Regel ein kleinerer Kraftbetrag, um den Körper (gleichförmig) in Bewegung zu halten.

Die maximal erreichbaren Haftreibungskräfte spielen in der Technik und im Verkehr eine große Rolle. Beim Anfahren,

Abbremsen, aber auch bei der Kurvenfahrt eines Fahrzeugs, wird das Fahrverhalten im Wesentlichen von den *Haftreibungskräften* bestimmt. Den kürzesten Bremsweg erreicht ein Autofahrer, wenn er so abbremst, dass die Reifen nicht ins Gleiten kommen. Moderne Bremshilfen, wie z. B. ABS, verhindern auch bei stärkstem Druck auf das Bremspedal ein Blockieren der Räder, was einen Gleitvorgang mit geringerer Verzögerung zur Folge hätte. Reibzahlen für die maximal mögliche Haftreibung können ohne großen Aufwand auf einer geneigten Ebene (sie wird in der Schule gelegentlich auch als schiefe Ebene bezeichnet) bestimmt werden. Dazu legt man z. B. einen Holzklotz auf ein Brett und vergrößert dann langsam den Steigungswinkel der Ebene bis zu dem Moment, in dem der Klotz ins Rutschen gerät. Bei diesem Winkelwert ist der Betrag der Hangabtriebskraft gleich dem Maximalwert der Haftreibung:

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \text{ oder } f = \tan \alpha.$$

BEISPIEL Gerät ein Körper beim Winkel $\alpha = 30^\circ$ gerade ins Gleiten, so beträgt die maximale Haftreibzahl für die beiden Materialien $f = \tan 30^\circ = 0,58$.

Würfe

Wenn sich Kinder Bälle zuwerfen, so fliegt der Ball zwischen den Fängern auf einer gekrümmten Bahn, einem nach unten geöffneten Parabelbogenstück. Obwohl im Flug nur die konstante Gewichtskraft auf den Ball einwirkt, ist seine Bewegung (zunächst) mit den Bewegungsgesetzen für *geradlinige* Bewegungen nicht zu berechnen. Doch hilft hier (wie auch bei vielen weiteren physikalischen Problemen) das *Ersatzprinzip* weiter:

Man kann häufig (doch nicht immer) einen komplizierten Bewegungsablauf durch zwei einfache, *geradlinige* Bewegungen ersetzen. Die anschließende rechnerische Überlagerung der beiden Ersatzbewegungen liefert das richtige Ergebnis, wenn die Teilbewegungen unabhängig voneinander ablaufen.

Bei Würfeln erfüllen die folgenden Ersatzbewegungen diese Bedingung, wenn der Einfluss der Luftreibung vernachlässigt werden kann.

a) Vertikaler Wurf nach oben

Jeder Körper, der senkrecht nach oben geworfen wird, kehrt nach einiger Zeit seine Flugrichtung um und kommt zum Werfer zurück. Diese Bewegung kann man sich als Überlagerung zweier geradliniger Bewegungen *vorstellen*, die gleichzeitig und unabhängig voneinander ablaufen (in Wirklichkeit führt der Körper natürlich nur *eine* Bewegung aus!):

- vertikal aufwärts: eine gleichförmige Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0
- vertikal abwärts: eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung mit $a = g$ (freier Fall).

Erfolgt der Abwurf zum Zeitpunkt $t = 0$ in Richtung einer nach oben positiv orientierten y -Achse, so kann man den Ort $y(t)$ und den Betrag der Momentangeschwindigkeit $v(t)$ zu jedem Zeitpunkt t durch einfache Addition berechnen:

Bewegungsgesetze des vertikalen Wurfs:

$$y(t) = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \text{ und}$$

$$v(t) = v_0 - g \cdot t \quad \left(\text{mit } g = +9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

BEISPIEL Ein Tennisball werde mit der Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ senkrecht nach oben geworfen.

Sein Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz lautet dann:

$$v(t) = v_0 - g \cdot t = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot t.$$

Wenn der Tennisball im höchsten Punkt seiner Bahn kehrt-macht, ist für einen kleinen Augenblick seine Geschwindigkeit 0. Setzt man $v = 0$, so liefert die Gleichung:

$$0 = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot t$$

– aufgelöst nach t – die Steigzeit des Balls: $t_s = \frac{30 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \approx 3,1 \text{ s}$.

Mit $t = t_s = 3,1 \text{ s}$ liefert das Weg-Zeit-Gesetz für die maximale Höhe des Wurfs:

$$y(t_s) = v_0 \cdot t_s - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_s^2$$

$$= 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 3,1 \text{ s} - \frac{1}{2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (3,1 \text{ s})^2 = 93 \text{ m} - 47,1 \text{ m} = 45,9 \text{ m}.$$

(Durch die unvermeidliche Luftreibung ist der Wert in Wirklichkeit wesentlich kleiner!)

b) Waagrechter Wurf

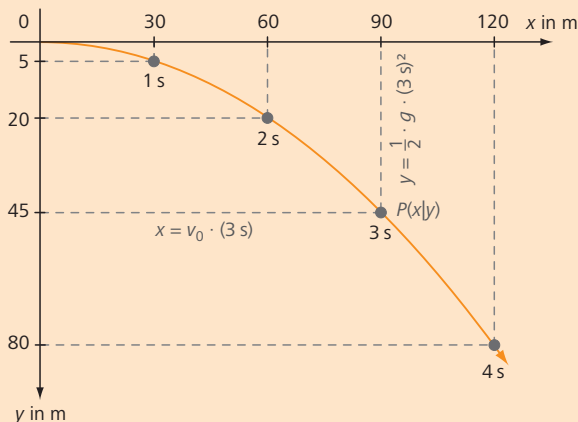
Auch ein Wurf mit horizontal gerichtetem Abwurf lässt sich aus 2 Teilbewegungen zusammensetzen. Man stellt sich dazu vor, dass der Abwurf im Ursprung eines rechtwinkligen Koordinatensystems erfolgt, die positiv orientierte y -Achse zeigt in diesem Fall zweckmäßigerweise nach unten.

Blickt man aus der Vogelperspektive, so wird man nur die x -Achse sehen und in x -Richtung eine gleichförmige Bewegung mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 wahrnehmen.

Blickt man von vorn auf die Wurfbahn (so, dass man die Projektion der Bahn auf die y -Achse sieht), scheint längs der y -Achse ein freier Fall abzulaufen.

Wie man dann bei seitlichem Blick auf die x - und y -Achse den Bahnverlauf des wirklichen Wurfs punktweise konstruieren kann, zeigt die folgende Skizze. (Da die beiden Teilbewegungen rechtwinklig zueinander orientiert sind, würde eine „normale“ Addition, wie dies bei senkrechten Würfeln möglich ist, ein falsches Ergebnis liefern. Man muss in diesem Fall „geometrisch“ [= vektoriell] addieren.).

Punktweise Konstruktion der Flugbahn eines Körpers, der horizontal mit $v_0 = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ abgeworfen wurde (gezeichnet mit dem Näherungswert $g = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$)

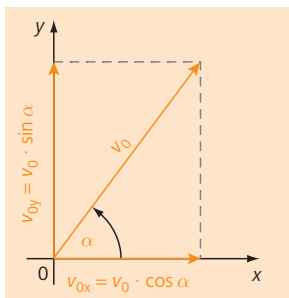


c) Schiefer Wurf

Auch bei schräg nach oben gerichteten Würfen kann dieses Verfahren angewandt werden. Es ist nur zu beachten, dass die Abwurfgeschwindigkeit v_0 zunächst in ihre x - und y -Komponenten zerlegt wird:

$$v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha \text{ und}$$

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha.$$



Die nachfolgenden Skizzen zeigen zwei Möglichkeiten einer Konstruktion der Bahnkurve eines mit $v_0 = 11,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ unter 60° schräg nach oben geworfenen Körpers.

1. Konstruktion: Die beiden Komponenten der anfänglichen Geschwindigkeit haben die Beträge:

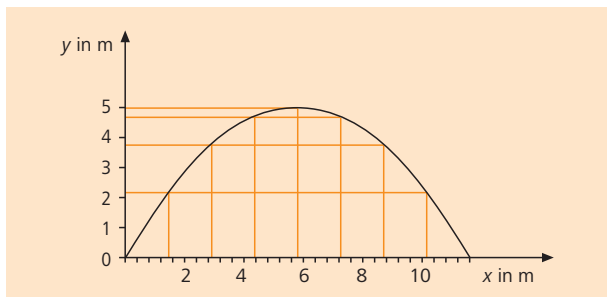
$$v_{0x} = v_0 \cdot \cos \alpha = 11,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{1}{2} = 5,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ und}$$

$$v_{0y} = v_0 \cdot \sin \alpha = 11,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,866 \approx 10,0 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

In der Abbildung unten wurden die Koordinaten $(x|y)$ für eine Anzahl Punkte (in Schritten von 0,25 s) nach den folgenden Gleichungen berechnet, eingezeichnet und dann verbunden:

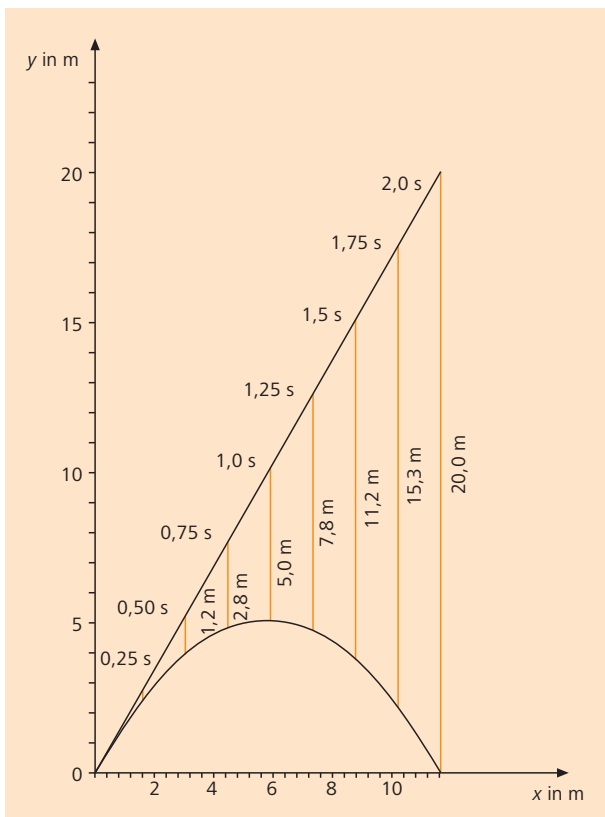
$$x = v_{0x} \cdot t = 5,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t$$

$$y = v_{0y} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 \approx 10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot t^2.$$



2. Konstruktion: Hierbei (s. Abb. S. 24) wird ein anderes Prinzip angewandt: Einer gleichförmig gedachten Bewegung mit der Geschwindigkeit $v_0 = 11,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ längs eines Strahls mit dem Steigungswinkel $\alpha = 60^\circ$ werden die Fallstrecken eines freien Falls punktweise angehängt – hier in 0,25-Sekunden-Abständen berechnet. Die Bahnkurve eines schiefen Wurfs im luftleeren Raum ist ein Parabelbogenstück, sie verläuft symmetrisch zu ihrem Hochpunkt.

Auch Bremsbewegungen von Fahrzeugen können als Überlagerung zweier Bewegungen betrachtet werden. Dies soll am Beispiel eines bremsenden Autos verdeutlicht werden.



Ein Auto fährt mit $v_0 = 180 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf der Autobahn. An einer Baustelle muss die Geschwindigkeit auf $v_1 = 40 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ verringert werden. Der Fahrer sieht das Hinweisschild erstmals in 100 m Entfernung vor der Baustelle.

Kann der Fahrer bei einer konstanten Verzögerung $a = 6,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ innerhalb von 100 m diese Geschwindigkeitsreduzierung vornehmen?

Sein Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz lautet in diesem Fall:

$$v_1(t) = v_0 - a \cdot t.$$

Von der Geschwindigkeit v_0 einer gleichförmigen Bewegung wird ein mit der Zeit anwachsender Betrag $a \cdot t$, der Geschwindigkeitswert einer beschleunigten Bewegung, subtrahiert.

Setzt man die speziellen Werte ein:

$$11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 6,0 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot t,$$

$$\text{so erhält man die Bremszeit: } t = \frac{38,9 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 6,48 \text{ s.}$$

Das Weg-Zeit-Gesetz für den Bremsweg s lautet in diesem Fall:

$$s(t) = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 = 50 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6,48 \text{ s} - \frac{1}{2} \cdot 6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (6,48 \text{ s})^2$$

$$= 324 \text{ m} - 126 \text{ m} = 198 \text{ m.}$$

Das Auto kommt nicht rechtzeitig zum Stehen. Auch im Weg-Zeit-Gesetz kann man die Weganteile der zwei Bewegungen erkennen.

Wenn Kräfte von konstantem Betrag einwirken und ihre Richtung stets rechtwinklig zur augenblicklichen Bewegungsrichtung ist

Die gleichmäßige Kreisbewegung

Mit einer Kraft dieser Art – genannt *Zentripetalkraft* – kann ein Körper auf eine Kreisbahn gezwungen werden. Die Kraftpfeile weisen auf einen festen Punkt: den Drehpunkt D der Kreisbewegung. Obwohl sich der Betrag der *Bahngeschwindigkeit*:

$$v = \frac{\Delta b}{\Delta t}$$

dabei nicht ändert, zählt die *gleichmäßige Kreisbewegung* zu den beschleunigten Bewegungen. (Wir setzen hier für die Wegstrecke s die Bogenlänge b ein.)

Elementarteilchens aufwenden muss, manifestiert sich bei diesem Prozess nach der EINSTEIN'schen Masse-Energie-Beziehung $W = m \cdot c^2$ anschließend in Form von Masse.)

8.1 Historische Atommodelle

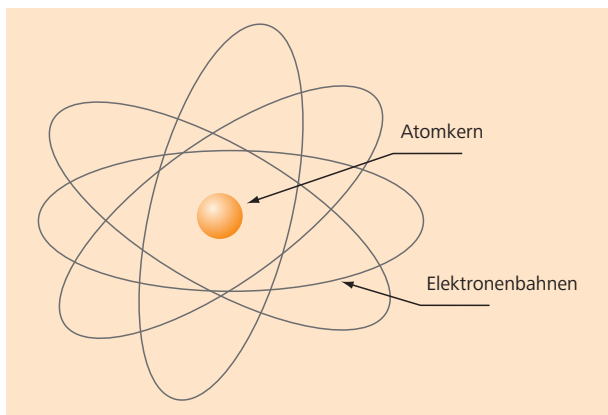
Vorstellungen, die man sich vom Aufbau der Atome macht, werden als *Atommodelle* bezeichnet. Diese haben sich in den vergangenen Jahrhunderten des Öfteren geändert. Durch neue Entdeckungen und erweiterte Untersuchungsmöglichkeiten mussten Modellvorstellungen nachgebessert und verfeinert werden. Neue Modelle lösten die alten ab, wenn sie die Natur besser beschrieben. Ob dasjenige Bild, das wir uns gegenwärtig vom Aufbau der Atome machen, in der Zukunft nochmals revidiert werden muss, kann augenblicklich niemand beantworten. Wenn wir die Geschichte der Atommodelle betrachten, wird man dies eher bejahen müssen.

Das Atommodell von RUTHERFORD

Ernest RUTHERFORD fand um 1905 heraus, dass die von Henri BECQUEREL entdeckte α -Strahlung aus einem Strahl zweifach positiv geladener Heliumkerne besteht, aus Ionen, deren Masse ca. 7 000-mal größer ist als die eines Elektrons. Als er (zusammen mit seinem Schüler Ernest MARSDEN) problemlos einen α -Strahl durch eine dünne Goldfolie schicken konnte, bezeichnete RUTHERFORD dies als das „unglaublichste Ergebnis, das ihm je widerfuhr“. Die α -Teilchen passierten die Goldfolie von mindestens 100 Atomlagen Dicke so, als wären die Atome „durchsichtig“, die Atome konnten deshalb keine undurchdringlichen Kugeln sein. Weitere Untersuchungen von RUTHERFORD zeigten, dass gelegentlich ein α -Teilchen etwas von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt wurde und – äußerst selten, aber doch nachweisbar – ein α -Teilchen an der Goldfolie zurückprallte. Für seine

Folgerungen aus diesen Versuchsergebnissen bezüglich eines Atombaus erhielt RUTHERFORD 1908 den Nobelpreis.

Nach den Vorstellungen des RUTHERFORD'schen Atommodells ist fast die ganze Masse eines Atoms in einem winzig kleinen Kern des Atoms vereinigt. Dieser harte Atomkern hat einen Durchmesser von ca. 10^{-14} m, 10 000-mal kleiner als der Atomdurchmesser. Er ist elektrisch positiv geladen, seine Ladung besteht aus Z positiven Elementarladungen (➔ S. 118).



Die Kernladungszahl Z charakterisiert die verschiedenen Elemente, bestimmt also die chemischen Eigenschaften. Eine gleich große negative Ladungsmenge bilden die Z Elektronen, die den Kern umgeben. Da zwischen dem Kern und den Elektronen anziehende elektrische Kräfte wirken, muss auf die Elektronen eine Gegenkraft einwirken, sonst wären sie schon bei der Entstehung der Elemente in den Kern gestürzt. Als einzige „Denkmöglichkeit“ bietet sich die Vorstellung an, dass die Elektronen auf Kreisbahnen den Atomkern umrunden, Bahnen, auf denen eine Zentrifugalkraft (➔ S. 25) nach außen wirkt.

Durch den anschaulichen Vergleich mit den Bahnen der Planeten, die eine zentrale Sonne umkreisen, fand dieses *Planetenmodell* des Atoms begeisterten Zuspruch, nicht nur bei Physikern.

Das Atommodell von BOHR

Den Dänen Niels BOHR beschäftigte ein „Schönheitsfehler“ des RUTHERFORD'schen Modells. Wenn das Elektron des Wasserstoffatoms (wir nehmen das einfachste Atom) aufgrund seiner Kreisbewegung nicht in den Kern stürzt, so ist es doch auf dieser Bahn beschleunigt. Selbst wenn der Betrag der Bahngeschwindigkeit konstant bleibt, zählen Kreisbewegungen (↗ S. 25) zu den beschleunigten Bewegungen und beschleunigte Ladungen wirken wie Antennen. Das Elektron müsste auf seiner Kreisbahn fortwährend Energie in Form einer elektromagnetischen Welle (↗ S. 150 ff.) abstrahlen. Dieser Energieverlust würde aber dazu führen, dass die Geschwindigkeit des Elektrons und damit der Bahnradius immer kleiner würden; das Elektron müsste auf einer Spiralbahn in den Kern stürzen. Dem widerspricht aber die Existenz von stabilen Wasserstoffatomen und auch das Linienspektrum des Wasserstoffs.

Die EINSTEIN'sche Lichtquantentheorie (↗ S. 184) deutet darauf hin, dass die Elektronen im Atom bestimmte Energiestufen besitzen. Dies hieße aber, dass die Elektronen mit ganz bestimmten Bahnradien den Kern umlaufen, Radien, die für jede Atomsorte einen typischen Wert hätten. Doch warum ist in Atomen nicht jede beliebige Größe möglich, während im Planetensystem der Sonne jeder Radius erlaubt ist?

BOHR schlug eine radikale Lösung vor: „In den Atomen ist ein Teil der bisherigen Physik außer Kraft gesetzt!“

Grundlage für das *BOHR'sche Atommodell* sind zwei Postulate:

1. Im Atom gibt es Bahnen, auf denen Elektronen strahlungslos und beliebig lange kreisen können.
2. Springt ein Elektron von einer Bahn mit größerem Radius (sie ist energiereicher) auf eine Bahn mit kleinerem Radius, so wird die Energiedifferenz $|W_2 - W_1|$ in Form eines Quants (↗ S. 184) der

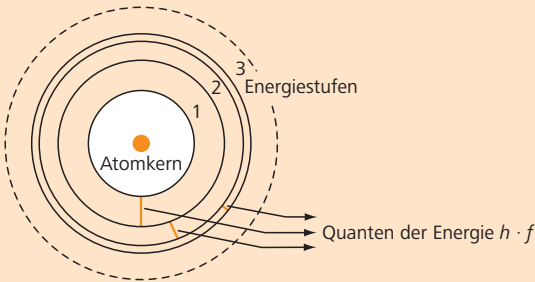
Energie $h \cdot f$ emittiert. Die diesem Quant zugeordnete Wellenlänge $\lambda = \frac{h \cdot c}{|W_2 - W_1|}$ wird im Linienspektrum gemessen.

Für die zulässigen Bahnradien im Atom postulierte BOHR (eine Reihe komplizierter Überlegungen) aus dem Bahnumfang U_n , der Elektronengeschwindigkeit v_n auf dieser Bahn, der Elektronenmasse m und der PLANCK'schen Konstanten h die **BOHR'sche Quantenbedingung**:

$$U_n \cdot m \cdot v_n = n \cdot h,$$

wobei $n = 1, 2, 3, \dots$ die Bahnen von innen nach außen durchnummeriert. Mit wachsendem n steigt die Gesamtenergie des Elektrons (= Summe aus kinetischer und potenzieller Energie). Zu jedem n -Wert gehört eine Energiestufe W_n , Zwischenwerte der Energie sind nicht erlaubt.

BOHR'sches Atommodell

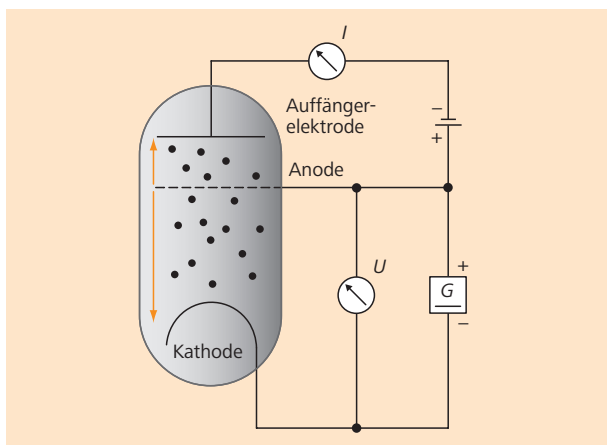


Mit den beiden Postulaten und der BOHR'schen Quantenbedingung konnten die Wellenlängen des Wasserstoffspektrums berechnet werden. Die Übereinstimmung mit den gemessenen Werten war frappierend, das BOHR'sche Atommodell schien glänzend bestätigt.

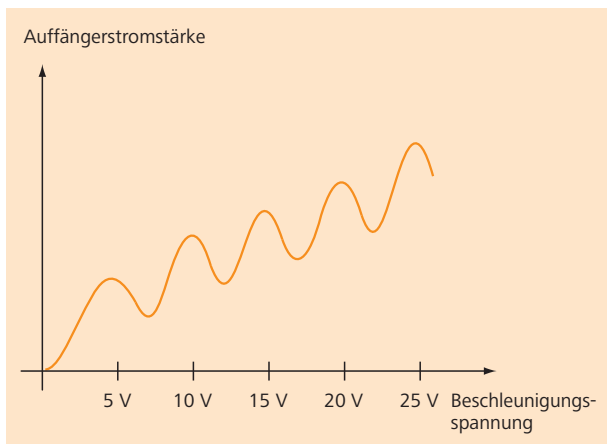
Der FRANCK-HERTZ-Versuch

Die im Zusammenhang mit der Lichtemission postulierten Energiestufen lassen sich auch auf eine andere Weise nachweisen. James FRANCK und Gustav HERTZ untersuchten erstmals 1912 die Energieübertragung von Elektronen auf Atome durch Stöße. Elektronen aus einer Glühkathode werden in einer Drei-Elektroden-Röhre zwischen Kathode und Anode beschleunigt. Da die Anode gitterförmig ausgebildet ist, fliegt ein Teil der Elektronen zu einer Auffängerelektrode weiter.

Ein Strommessgerät zeigt bei konstanter Kathodentemperatur und konstanter Beschleunigungsspannung eine konstante Stromstärke an. Wird die Röhre mit einem Gas oder einem Dampf gefüllt (z. B. Quecksilber), so prallen die Elektronen gelegentlich auf Atome, geben bei dem Stoß Energie ab und fliegen mit verminderter Geschwindigkeit weiter. Wird nun durch eine weitere Spannungsquelle zwischen Anode und Auffängerelektrode ein elektrisches Gegenfeld angelegt, so sinkt die Anzeige des Strommessers. Analog dem Anlaufen gegen einen Berg erreichen nur noch die schnellsten (= energiereichsten) Elektronen



die Auffängerelektrode. Steigert man in dem Versuch die Beschleunigungsspannung (bei konstanter Gegenspannung), so erhält man die in der Abbildung ersichtliche Strom-Spannungskennlinie.



Von 0 V ausgehend steigt zunächst die Stromstärke an, bis sie bei ca. 5 V absinkt, um anschließend wieder zu steigen. In regelmäßiger Folge wiederholen sich relative Maxima und Minima der Stromstärke. Bei einer Spannung von 5 V verlieren offenbar viele Elektronen durch Stöße mit Quecksilberatomen Energie, aber warum geschieht dies nicht schon bei kleineren Beschleunigungsspannungen?

Eine Antwort folgt aus der Energiestufenhypothese: Quecksilberatome können nur ganz *bestimmte* Energiebeträge des stoßenden Elektrons aufnehmen. Die Masse eines Quecksilberatoms ist ca. 400 000-mal größer als die Masse eines Elektrons. Bei einem Stoß prallt daher das Elektron ab wie ein Ball von einer Wand, ohne Energie zu verlieren (↗ vollelastischer Stoß). Das Quecksilberatom kann nur dann Energie aufnehmen, wenn es vom Grundzu-

stand in einen energetisch angeregten Zustand übergehen kann. Die kleinstmögliche Energieportion beträgt bei Quecksilber 4,9 eV. Unterstützt wird diese Hypothese durch die Beobachtung, dass das Quecksilberatom UV-Licht der Frequenz:

$$f = \frac{W}{h} = \frac{4,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 1,2 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$$

emittiert, sobald die Stromstärke das erste Mal absinkt.

Jedes angeregte Hg-Atom sendet ein Lichtquant dieser Frequenz aus, wenn es in den Grundzustand zurückfällt. Bei Beschleunigungsspannungen größer als 10 V kann ein Elektron mehrmals hintereinander diesen Energiebetrag auf verschiedene Hg-Atome übertragen. Dies erklärt die Stufen der Stromkurve in regelmäßigen 4,9-V-Abständen der Spannung.

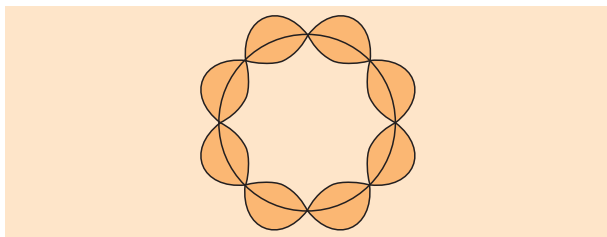
Trotz des Erfolgs in der Spektroskopie blieb BOHR'S Theorie unbefriedigend:

- Die Postulate negierten ein Grundgesetz der Physik, sie blieben unverständlich.
- Die Anwendung des BOHR'schen Modells auf Atome mit mehreren Elektronen scheiterte. Schon beim Helium mit zwei Elektronen stimmten die berechneten Frequenzen mit den gemessenen nicht mehr überein. Einen ersten Schritt zur Lösung dieser Probleme lieferte die Doktorarbeit von Louis DE BROGLIE im Jahr 1924. Die von DE BROGLIE formulierten Elektronenwellen (➤ S. 193) lieferten einen Schlüssel zum Verständnis der stabilen Bahnen.

Ein Wellenvorgang transportiert keine Energie, wenn sich eine stehende Welle (➤ S. 87) ausbildet. Die Energie ist dann zwischen den Knoten „eingefangen“.

Sieht man die Elektronen des Atoms als einen Wellenvorgang an, so ist bei einer stehenden Welle längs der Kreisbahn die Energie konstant, der Bahnradius kann stabil bleiben. Stehende Wellen können sich längs einer Kreislinie aber nur dann ausbilden, wenn

die DE-BROGLIE-Wellenlänge $\lambda = \frac{n \cdot h}{m \cdot v_n}$ ganzzahlig oft in den



Umfang „passt“: $n \cdot \lambda = U_n = 2\pi \cdot r_n$. Ein Einsetzen der DE-BROGLIE-Wellenlänge liefert die BOHR'sche Quantenbedingung.

DE-BROGLIE-Elektronenwellen erklärten jedoch nicht, warum diese Theorien bereits beim He-Atom versagen. Der Grund dafür wurde erst später entdeckt: BOHR hatte das Elektron als „klassisches Teilchen“ angesehen, ausgestattet mit einem ganz bestimmten Impuls auf einer Bahn mit einem ebenso genau angebbaren Radius. Die Quantentheorie des Elektrons (➔ S. 193) und die Unbestimmtheitsrelation von HEISENBERG (➔ S. 196) machen aber deutlich, dass der Bahnbegriff auf das Verhalten eines einzelnen Elektrons nicht passt, Ort und Impuls (und damit die Geschwindigkeit) können bei Mikroobjekten nicht gleichzeitig scharfe, messbare Werte annehmen.

Erst die konsequente Anwendung der Quantenphysik löste die letzten Widersprüche. Das BOHR'sche Modell in seiner ursprünglichen Form wird deshalb heute als ein unzutreffendes, falsches Modell angesehen, das nur *zufällig* für Wasserstoff richtige Werte liefert.

8

8.2 Das Orbitalmodell

Darstellungen des Wasserstoffs im *Orbitalmodell* finden sich in jedem Chemiebuch, wolkenartige Gebilde, die keine Elektronenbahnen erkennen lassen. Die Dichte eines Punkterasters oder Farbabstufungen symbolisieren die Antreffwahrscheinlichkeit

Stichwortverzeichnis

Aggregatzustand 54

Aktivität 228

Amplitude 71

Äquivalentdosis 233

Atommodelle, historische 198 ff.

–, nach BOHR 200 f.

–, nach RUTHERFORD 198

Atomphysik 197 ff.

Ausbreitungsgeschwindigkeit

von Wellen 81

Auslenkung 71

Austauschteilchen 247

Bäuche einer stehenden Welle 87

Baryon 240

Beharrungsvermögen 9

Beschleunigung 14, 242

β -Zerfall 225

Beugung von Wellen 89, 161

Bewegungen

–, gleichförmige 10 ff.

–, gleichmäßig beschleunigte 13 ff.

Bewegungsarbeit 39

Bewegungsgesetze

–, der gleichförmigen Bewegung 12

–, der gleichmäßig beschleunigten

Bewegung 16

–, des freien Falls 16, 20

–, des vertikalen Wurfs 20

BOHR'sche Quantenbedingung

201

BRAUN'sche Röhre 110 ff.

Brechung von Wellen 89, 162

Brechungsgesetz 159, 164

COMPTON-Effekt 191

DE-BROGLIE-Wellenlänge 194

Dielektrikum 101

Dielektrizitätszahl 101

Dipol, hertzscher 149

Dispersion 159

Doppelspalt 165

EDISON-Effekt 110

Effektivwert einer Wechselspannung 138 f.

Eigenfrequenz 79

Eigenfrequenzen einer Saite

88, 245

EINSTEIN-Gerade 185

EINSTEIN-Gleichung 185

Elastischer Stoß 43

Elektrische Feldstärke E 97, 245

Elektrische Influenz 94

Elektrische Ladung 91

Elektrische Spannung 98, 246

Elektrizitätslehre 91 ff.

Elektromagnetische Induktion 120

Elektronenwellen 193

Elektronenvolt (eV) 183

Elektrostatik 93

Elementarladung e 118, 251

Elementarwelle 162

Elongation 71

Energie

–, Bewegungsenergie (= kinetische Energie) 35, 243

–, des elektrischen Felds 102

–, des magnetischen Felds 130

–, innere 54

–, Lageenergie (= potenzielle Energie) 35, 243

–, Spann(ungs-)energie einer Feder 35, 243

–, thermische 54

Energiedosis 232

Energieerhaltungssatz 34
Erhaltungssätze der Mechanik 34 f.

Fadenpendel 70, 78
Fadenstrahlröhre 116
Farad (F) 100, 246
Farbe 240
Federpendel 70, 76
Feld
–, elektrisches 91, 93 ff., 110 ff.
–, homogenes elektrisches 96 f.
–, magnetisches 104 ff., 114 ff.
Flavor 241
Feldkonstante
–, elektrische - ϵ_0 101, 251
–, magnetische - μ_0 108, 251
Fotoeffekt 180
Fotozelle 181
FRANCK-HERTZ-Versuch 202
Frequenz 26, 72

GALILEI-Transformation 212
Gangunterschied 85, 175
Gasgleichung
–, allgemeine 51
–, universelle 52
Generator 60, 120
Geschwindigkeit
–, Bahngeschwindigkeit 25
–, mittlere 10, 239
–, Momentangeschwindigkeit
14, 242
Geschwindigkeits-Zeit-Gesetz 11
Gesetz von GAY-LUSSAC 49
Gitter, optisches 169
Glühel elektrischer Effekt 110
Gravitationsgesetz 30
Grundgesetz der Mechanik
(Newton) $F = m \cdot a$ 15

Halbwertszeit 226
Hadron 240
HALL-Effekt 114
HALL-Sonde 114
Hangabtriebskraft 17
Harmonischer Oszillator 79
Hauptquantenzahl 208
Hauptsatz der Wärmelehre
–, 1. Hauptsatz 56
–, 2. Hauptsatz 59
HEISENBERG'sche Unbestimmtheitsrelation 197
Heißluftmotor 58, 60
Henry (H) 130, 247
HERTZ'scher Dipol 149
Hubarbeit 39
HUYGENS'sches Prinzip 162

Ideales Gas 49
Impedanz Z 141
Impuls 41, 243
Impulserhaltungssatz 42
Impulssumme 42
Induktionsgesetz 122
–, in der Fluss-Schreibweise 126
Induktivität L einer Spule 129 f., 247
Influenz, elektrische 94
Innere Energie 54
Interferenz des Lichts 165
Interferenz von Wellen 83 ff.
–, konstruktive 85
–, destruktive 85

Joule (1 J) 37, 243

Kapazität C 99, 246
Kapazität eines Plattenkondensators 100 ff., 246
Kelvin (K) 50 f., 244
KEPLER'sche Gesetze 32

Kernfusion 239 ff.
 Kernzerfall 226 ff.
 Knotenstellen einer stehenden Welle 87
 Kondensator 100 ff.
 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 213
 Kraft
 –, auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld 109, 247
 –, elektrische Feldkraft 97, 246
 –, Haftreibungskraft 18
 –, Hangabtriebskraft 17
 –, LORENTZ-Kraft 114, 247
 –, nach NEWTON 15, 242
 –, Normalkraft 17
 –, Reibungskraft 18, 242
 –, Zentrifugalkraft 27
 –, Zentripetalkraft 25, 243
 –, Ziehkraft 27
 Kreisbewegungen, gleichmäßige 25
 Kreisfrequenz 73, 137

Ladung, elektrische 91 ff., 245
 Längenkontraktion 216 ff.
 Längswelle 81
 Leistung 40, 243
 LENZ'sche Regel 123
 Leptonen 239
 Lichtquant 184
 Lichtuhr 214
 Longitudinalwelle 81
 LORENTZ-Kraft 114 f.

Magnetfeld 104 f.
 Magnetische Flussdichte Φ 107, 246

Magnetische Flussdichte im Innern einer Spule 107, 246
 magnetischer Fluss Φ 125, 247
 Masse-Energie-Beziehung 198
 Masse-Energie-Äquivalenz 216
 Mechanik 9 ff.
 Meson 240
 Messung der Lichtwellenlänge
 –, beim Doppelspalt 166 ff.
 –, beim Gitter 169 ff.
 MILLIKAN-Versuch 118 ff.
 Modulation 154
 Myon 216

Neutralisation 92
 Normalkraft 17

Orbitalmodell 205 f.
 Oszillator 150
 –, harmonischer 79
 Oszillogramm 75, 138
 Oszilloskop 112

Pauli-Prinzip 209
 Periode 72
 Periodendauer 72
 –, eines Fadenpendels 78, 245
 –, eines Federschwingers 76, 245
 –, eines harmonischen Schwingers 79
 Photon 184
 Photonentheorie des Lichts 180 ff.
 PLANCK'sche Konstante h 185, 251
 Planetenbewegungen 30 ff.
 Polarisation 94
 Polarisation des Lichts 178 f.
 Potenzialtopf 207
 Probeladung q 96
 Punktmechanik 9

Quantenzahl 208

Quarks 239

Querwelle 81, 178

Radialfeld 96

Radioaktivität 221 ff.

Reibungsarbeit 39

Reibungskraft 17 f.

Relativistische Masse 217

Relativitätstheorie 211 ff.

Relative Dielektrizitätszahl ϵ_{rel}
101

Relative Permeabilitätszahl μ_{rel}
108

Resonanz 80

Röntgenbremsstrahlung 189

Röntgenstrahlung 178

Ruheenergie 219

Ruhemasse des Elektrons m_0
119, 251

Schalenmodell 209

Scheitelwert einer Wechsel-
spannung 137

Schrödingergleichung 207 f.

Schwingkreis, elektrischer 150

Schwingungen

–, eines Fadenpendels 78

–, eines Federpendels 76

–, elektromagnetische 147 ff.

–, erzwungene 79

–, harmonische 72

–, mechanische 70 ff.

–, ungedämpfte, elektrische 152

Schwingungsformel,
thomsonsche 151

Selbstinduktion 127 ff.

Selbstinduktionsspannung
129, 247

Solarzelle 188

Spektrometer 173

–, Gitterspektrometer 173

–, Massenspektrometer 118

–, Prismenspektrometer 173

Spektrum 171

–, kontinuierliches 174

–, Linienspektrum 174

Sperrkreis 146

spezifische Ladung des Elektrons $\frac{e}{m}$
112, 116 f., 251

spezifische Wärmekapazität 54

Standardmodell 239

STEFAN-BOLTZMANN'sches
Gesetz 64

Stehende Welle 86 f.

STIRLING-Motor 58, 60

Stoß

–, unelastischer 43

–, vollelastisch, zentraler 42

Strahlungsintensität 63 f., 244

Temperaturskala

–, absolute 50, 244

–, nach CELSIUS 47, 244

Tesla (T) 107, 246

Thermische Energie 54

Thermodynamik 45 ff.

THOMSON'sche Schwingungs-
formel 151

Trägheitsprinzip 9

Transformator 132 ff.

–, Transformatorgleichung 133

Transversalwelle 81

Tröpfchenmodell 236

Tunneleffekt 224

Umlaufdauer 26

Unbestimmtheitsrelation 196

Unelastischer Stoß 43

Wahrscheinlichkeitswellen 193 ff.

Wärmelehre 45 ff.

Wärmepumpe 60

Wärmetransport 62

Watt (W) 40, 243

Wechselspannung 132 ff., 247

Wechselstrom 132 ff.

Weg-Zeit-Gesetz 11

Wellen

–, elektromagnetische 147 ff.

–, mechanische 80 ff.

–, stehende 86

Wellenformel 82

Wellenfunktion 207

Wellenlänge λ 82

Wellentheorie des Lichts

157 ff., 161

Widerstand

–, induktiver X_L 141, 247

–, kapazitiver X_C 144, 247

WIEN'sches Verschiebungsgesetz

66

Winkelgeschwindigkeit ω 26, 242

Wirbelfeld, magnetisches 105

Wirkungsgrad

–, mechanischer 41, 243

–, thermodynamischer 59, 244

Wurf 19 ff.

–, schiefer 22

–, vertikaler 20

–, waagrechter 21

Zeitdilatation 214 ff.

Zentrifugalkraft 27

Zentripetalkraft 25

Zerfallsreihe 228

Damits im Mündlichen rundläuft!

Was genau ist die Ausgangssituation?

- Mündliches Prüfungsfach:
→ langfristige Vorbereitung und Zeitplan erstellen

ODER

- Das Bestehen des Abis ist nur durch gute mündliche Prüfung möglich:
→ voller Lerneinsatz

ODER

- Reine Notenverbesserung:
→ Aufwand und Erfolgsaussichten abwägen

Prüfungsumfeld sondieren

- Sind Hilfsmittel (Wörterbuch, Formelsammlung) erlaubt?
- Stellen Sie sich auf den Prüfer ein, z. B. auf seine Fragetypen.
- Nehmen Sie (sofern möglich) als Hospitant an einer Prüfung teil.

Inhalte abklären

- Informieren Sie sich genau über Verlauf und Gewichtung der einzelnen Prüfungsteile.
- Sprechen Sie mit dem Prüfer Prüfungsschwerpunkte ab.
- Bereiten Sie sich auch auf Nebengebieten vor.

In der Prüfung

Nutzen Sie die Vorbereitungszeit!

- Lesen Sie die Aufgabe genau durch. Unterstreichen Sie die wesentlichen Stellen.
- Notieren Sie stichwortartig die Antworten. Fangen Sie mit dem an, was Sie wissen.
- Verwenden Sie ein separates Blatt für spontane Ideen.
- Achten Sie unbedingt auf die Zeit.

Vortrag und Kolloquium (Prüfungsgespräch)

Achten Sie auf

- eine nachvollziehbare Gliederung,
- die Verwendung von Fachbegriffen,
- Satzbau und Stil (keine Umgangssprache).

Überzeugen Sie mit einer guten Argumentation:

- Belegen Sie Ihre Aussagen.
- Stellen Sie Zusammenhänge her.
- Begründen Sie Ihren Standpunkt.
- Überlegen Sie sich Beispiele.
- Unterscheiden Sie zwischen Wichtigem und Unwichtigem.
- Geben Sie einen Ausblick.

Verhaltenstipps

- Begrüßen Sie alle Prüfenden.
- Wiederholen Sie anfangs noch einmal das Thema.
- Lenken Sie das Gespräch auf Bereiche, in denen Sie sich auskennen.
- Weiten Sie geschlossene Fragen nach Fakten aus.
- Zeigen Sie am Schluss der Prüfung Selbstsicherheit.

Bewertungskriterien üben

- Analysieren Sie die speziellen Fragetechniken Ihres Lehrers im Unterricht.
- Üben Sie Antworten auf offene und geschlossene Fragen.
- Gewinnen Sie Routine bei der mündlichen Mitarbeit im Unterricht oder bei Kurzreferaten und analysieren Sie die Rückmeldungen Ihrer Lehrer zu
 - fachlicher Richtigkeit und Vollständigkeit,
 - logischem Aufbau,
 - Ihrem sprachlichen Ausdruck (Fachbegriffe, ganze Sätze) sowie
 - Ihrer Darstellung und dem Medieneinsatz.

Inhalte eingrenzen

- Welche Themen waren in den letzten vier Halbjahren relevant?
- Achten Sie auf Hinweise Ihres Lehrers.
- Achten Sie darauf, welche Referatsthemen vergeben werden.

Physik Abi

Das Kompaktwissen für die Oberstufe:

- Mechanik des Massenpunkts
- Thermodynamik, mechanische Schwingungen und Wellen
- Elektrizitätslehre, elektromagnetische Schwingungen und Wellen
- Wellen- und Photonentheorie des Lichts
- Atomphysik und Einblick in die Physik des 20. und 21. Jahrhunderts

Praktisch aufbereitet mit Beispielaufgaben und der Hervorhebung besonders wichtiger Informationen

Für Referate, Klausuren, Tests und die Abiturprüfung

ISBN 978-3-411-87190-2

8,99 € (D) · 9,30 € (A)

