

Konzeptvorlesung 9

1. Jahr – Block 1 – Woche 2

Größenverhältnisse, Materie–Wellen und Aufbau der Materie

Physik

PD Dr. Hans Peter Beck

Laboratorium für Hochenergiephysik, Universität Bern

B1-Wo2-KV9

Größenverhältnisse im Universum – von Galaxien bis zu Elementarteilchen

- **Messen und Masseinheiten**
 - Wie misst man? / SI Basiseinheiten

- **Teilchen oder Wellen?**
 - Materiewellen

- **Aufbau der Materie**
 - Aufbau eines Atoms / Eigenschaften der Elementarteilchen

- **Ansätze für das Bohr'sche Atommodell**
 - Durchmesser von Atomen
 - Energieniveaus
 - Energiebeträge bei chemischen und bei atomaren Reaktionen
 - Spektrallinien

Physik im Medizinstudium (PBL)

1. Semester

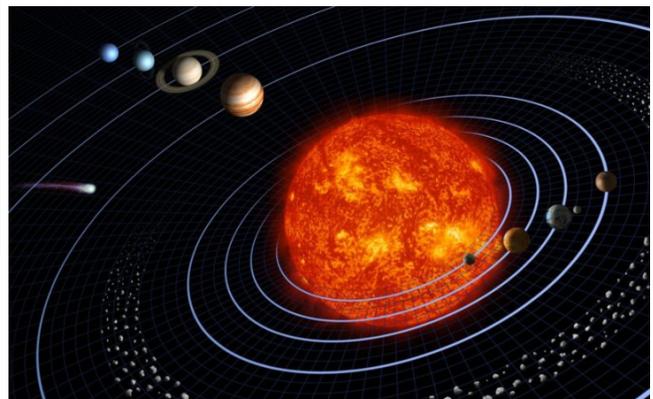
Wo2	KV9	Größenverhältnisse, Materie-Wellen und Aufbau der Materie
	Tutorium	Größenverhältnisse
	FP	Licht und Materie
	Sem1 Phys	Stützunterricht Physik: Physikalische Größen / Mathematische Grundlagen
	Fsp	Fachsprechstunde
Wo3	Sem2 Phys	Mechanik
Wo4	KV17/18	Bioelektrizität
	FP	Charakterisierung elektrischer Leiter und Halbleiter
	Sem3 Phys	Elektrizitätslehre
Wo5	KV23	Energie
	Sem4 Phys	Wärmelehre, Energiesatz
Wo6	KV30	Mikroskop
	FP	Optik
	Sem5 Phys	Optik
	Fsp	Fachsprechstunde
Wo7	KV40/41	Elektromagnetische Wellen
	Tutorium	Die Sonne
	Fsp	Fachsprechstunde
Wo8	KV2	Elektrizität
	FP	Signalerfassung

Größenverhältnisse



← 10²¹m →

← 10¹³m →



**Physik handelt vom Verhalten und Struktur der Materie und Strahlung.
Sie ist die Grundlegendste aller Wissenschaften.**

**Sämtliche Materie und Strahlung im Universum besteht aus den selben Urbausteinen, die
Elementarteilchen (Elektronen, Quarks, Photonen,...).**

...und gehorcht demzufolge den selben Gesetzen der Physik.

Größenverhältnisse



← 10⁷m →

← 10²m →



Jedes Elementarteilchen hat eine beschränkte Anzahl von Eigenschaften

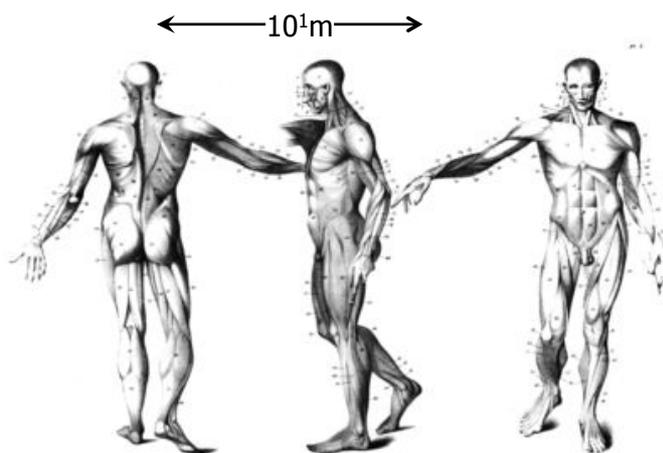
→ Masse, Ladung, etc.

Es gibt keine Unterschiede zwischen gleichen Elementarteilchen

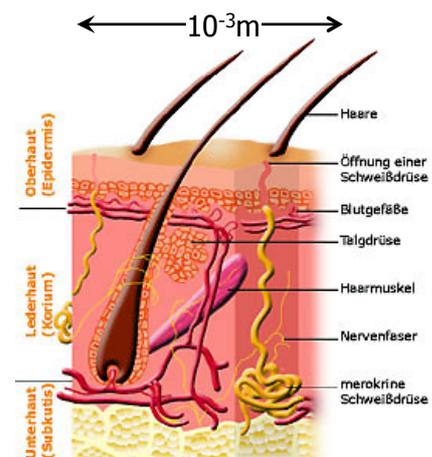
→ Jedes Elektron, Quark, Photon, ... ist exakt gleich jedem anderem Elektron, Quark, Photon, ...

⇒ somit lassen sich die Gesetze der Physik mathematisch beschreiben.

Größenverhältnisse



← 10¹m →



← 10⁻³m →

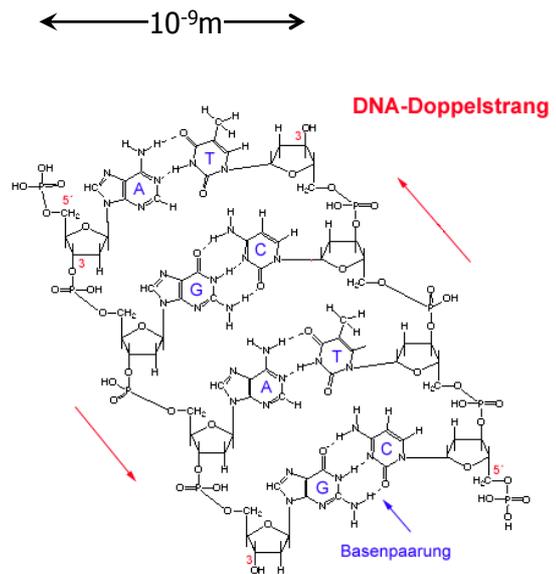
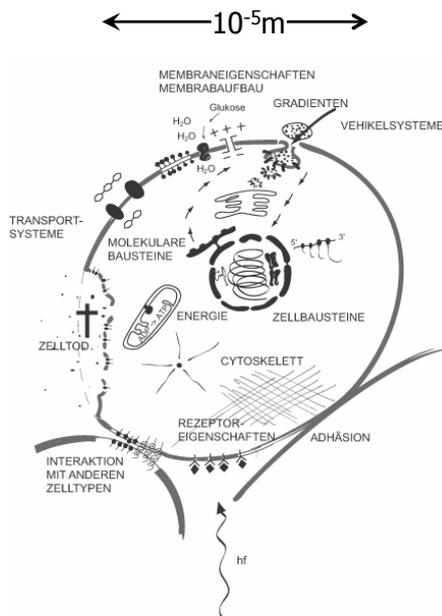
- **Durch Beobachten, Vergleichen, Messen, Experimentieren, Denken, mit Hilfe der Mathematik, und Rechnen, und Überprüfen,...**

**...können die fundamentalen Gesetze der Physik gefunden werden
... und universell angewandt werden!**

Dieser Prozess ist nicht abgeschlossen!

→ neue Experimente am CERN, ...

Größenverhältnisse



□ Vorgänge in lebenden Organismen sind durch physikalische Gesetze bestimmt und können mit physikalischen Methoden erforscht und verstanden werden

Mechanische Eigenschaften

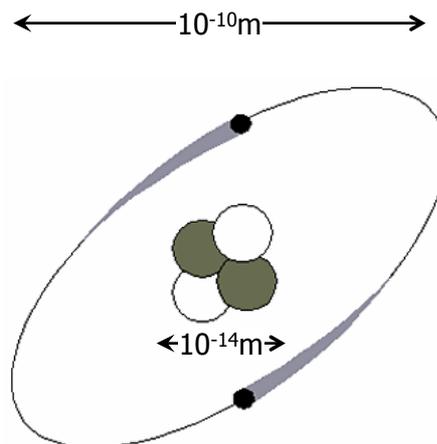
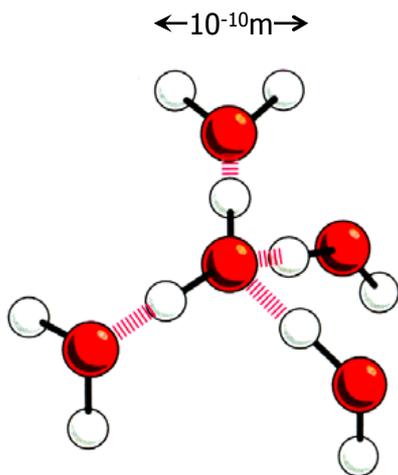
Elektrische Eigenschaften

– Kraft [N], Impuls [$\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], Energie [J], Temperatur [K],...

– Ladung [C], Feldstärke [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$], Spannung [V], Strom [A], Widerstand [Ω], Kapazität [F],...

(Gilt für Ionen sowie für neutrale Moleküle, da diese eine Ladungsverteilung haben...)

Größenverhältnisse



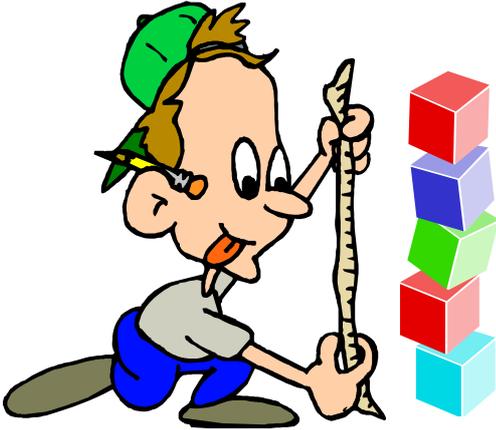
Moleküle sind aus Atomen aufgebaut

Atome bestehen aus einem kleinen massiven Kern (Protonen, Neutronen), welche von leichten Elektronen umgeben sind. Atome sind im wesentlichen leer!

Kernkräfte (→ Quarks sind diejenigen Elementarteilchen aus welchen Protonen und Neutronen aufgebaut sind) sind kurzreichweitig ($r < 10^{-14}\text{m}$) und spielen nur innerhalb des Atomkerns eine Rolle. Sie können in der Atomphysik getrost *vernachlässigt* werden.

Einzig die **Konfiguration der Hüllenelektronen** bestimmt die Eigenschaften der Atome und somit die Eigenschaften von Molekülen → **Physikalische Gesetze bestimmen die Chemie**

Wie misst man?



Beim Messen vergleicht man das zu messende Objekt mit einem **normierten Massstab**.

Festlegung normierten Massstäbe \Rightarrow SI
(**SI = *Système International d'Unités***)

Sieben Basiseinheiten:

Meter [m], Kilogramm [kg], Sekunde [s],
Ampère [A], Kelvin [K], Mol [mol], Candela [cd]

Sowie aus diesen **abgeleitete Größen**:

zBsp. Energie [J]=[kg·m²·s⁻²]



Links: Internationaler Prototyp des **Kilogramms**
und sechs offizielle Kopien.

Rechts: Internationaler Prototyp des **Meters**
1875 - Meter Konvention von 30 Staaten unterzeichnet.

Seit 1983: 1 m = die Strecke welche Licht im Vakuum
in einer 1/299'792'458 Sekunde durchläuft.

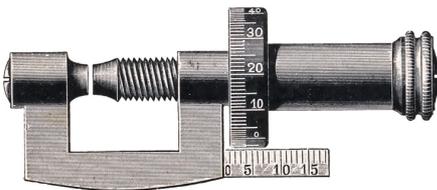
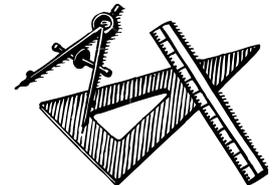


B1-Wo2-KV9

©HPB11 9

Wie misst man?

Um besonders kleine Objekte zu messen, bedarfs es einiger Tricks!
(Besonders, wenn man Zellen, Moleküle, Atome, oder Atomkerne messen möchte....)



Mikrometerschraube

Auflösung ca 10^{-6} m = 0.001 mm = 1 μ m



Optische Instrumente
Lupe, Mikroskop, ...

Auflösung begrenzt durch Beugungseffekte
ca. $2 \cdot 10^{-7}$ m = 200 nm

\rightarrow **Wellennatur des Lichts!**

$\lambda_{\text{sichtbar}} = 380-750$ nm



B1-Wo2-KV9

©HPB11 10

Teilchen und Wellen



Licht als Teilchenstrahlung

(1669 Isaac Newton, 1905 Albert Einstein)

- **geradlinige** und **allseitige** Ausbreitung von Licht
- Energie** und **Impuls** von Licht
- Photoelektrischer Effekt** (→ Solarzellen, Photosynthese)
- Erzeugung von Röntgenstrahlung**, etc.

mit Licht-Teilchen natürlich erklärbar ⇒ **Photonen**.



Licht als Welle (1677 Christian Huygens)

- **Beugung, Interferenz**

Licht als elektromagnetische Welle

Theorie (1871 James Clerk Maxwell)
Experiment (1886 Heinrich Hertz)

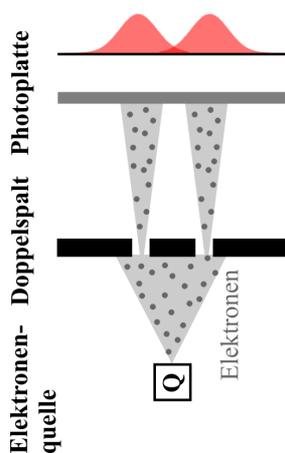
- **Radio, TV, Handy, Röntgenstrahlung, ...**

Lichtteilchen haben offenbar auch Welleneigenschaften !

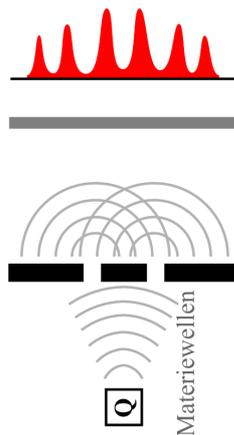
Gilt dies nur für Licht, oder gilt dies für alle Sorten von Teilchen ?

Materie-Wellen

Klassische Erwartung (Abbilder der Spalte)



tatsächliches Experiment (Interferenzmuster)



Photonen zeigen sowohl Wellen als auch Teilchencharakter.

Dies gilt allgemein für Materie und nicht nur für Licht.

Allerdings sind für makroskopische Objekte die *zugehörigen Wellenlängen* unmessbar klein, so dass uns die Welleneigenschaft von Materie im Allgemeinen verborgen bleibt!

Falls Elektronen keine Welleneigenschaft besäßen...

Tatsächliche Messung **Elektronen zeigen Welleneigenschaften.**

Gilt nicht nur für Elektronen, sondern **für alle Materie.**

Materie-Wellen

Wenn Materie Wellencharakter haben soll,
muss es eine zugehörige Wellenlänge gegen.

- Wellenlänge λ [m] (Länge)
- Impuls p [kg · m · s⁻¹] (Masse × Geschwindigkeit)
- Planck'sche Konstante $h = 6.62606896(33) \cdot 10^{-34}$ Js (Energie × Zeit)

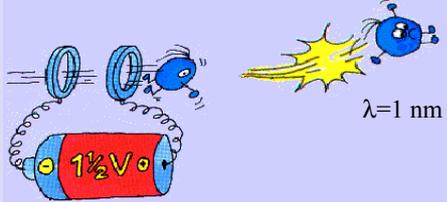
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{\text{Planck'sche Konstante}}{\text{Impuls}}$$

Je grösser der Impuls, desto kleiner die Wellenlänge des Teilchens

→ **Auflösungsvermögen**

zBsp Elektron beschleunigt mit einer Batterie (1.5 V)

→ Elektron hat die Energie von 1.5 eV
(Elektronenvolt: 1 eV = 1.6x10⁻¹⁹ J)



Elektronenmikroskope basieren auf dem Wellencharakter schneller Elektronen.

Teilchen-Wellen

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad \Rightarrow \text{Wellenlänge} = \frac{\text{Planck'sche Konstante}}{\text{Impuls}}$$

Teilchen		Energie	Wellenlänge	
Photon	Sichtbares Licht	1.655 – 3.26 eV	750 – 380 nm	1 nm = 10 ⁻⁹ m
	UV Licht	3.26 – 124 eV	380 – 10 nm	
	Röntgenlicht	124 – 12400 eV	10 – 0.01 nm	
Elektron	Elektronenmikroskop	4 – 400 keV	0.3 pm – 3 pm	1 pm = 10 ⁻¹² m
	Teilchenbeschleuniger	bis 100 GeV	0.6 fm	1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
Proton	Teilchenbeschleuniger	bis 7 TeV	1.7 am	1 am = 10 ⁻¹⁸ m

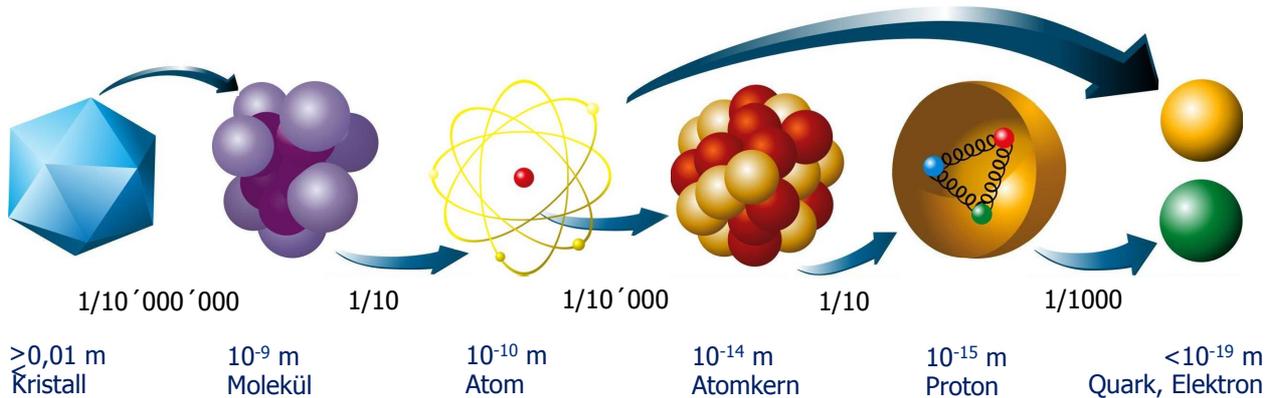
Mit Teilchenwellen können kleinste Strukturen erforscht werden.

Aktuell beste Strukturauflösung (Large Hadron Collider, LHC) bei ~10⁻¹⁹ m

Atomradien: 10⁻¹⁰ m
 Radius von Atomkernen: 10⁻¹⁴ m

Man kann tief in Atome und sogar in Atomkerne hineinsehen!

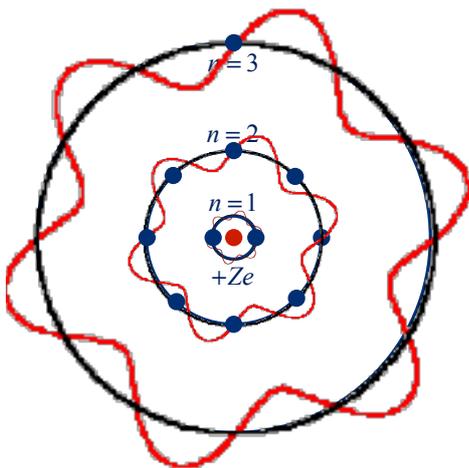
Der Aufbau der Materie



Stecknadelkopf
 $10^{-3}\text{m} = 0,001\text{ m}$

Elementarteilchen → Elektron, Quark:
 $< 10^{-19}\text{m} = 0,000'000'000'000'000'000'1\text{ m}$

Aufbau der Materie: Einfaches Atommodell



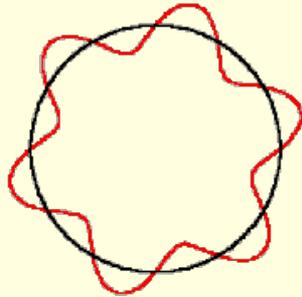
1. Elektronen bewegen sich auf **stabilen Kreisbahnen** um den Atomkern, welche mittels **Quantenzahlen $n=1,2,3,\dots$** gezählt werden.
2. Auf jeder Bahn haben maximal **$2 \cdot n^2$** Elektronen Platz
3. Die äusserste Bahn ist im allgemeinen nicht vollständig mit Elektronen gefüllt
 - wichtig für chemische Bindungen
 - Bei Edelgasen ist die äusserste Bahn vollständig gefüllt
4. Der Umfang der Kreisbahn ist ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge der Elektronen

Elektronenbahnen

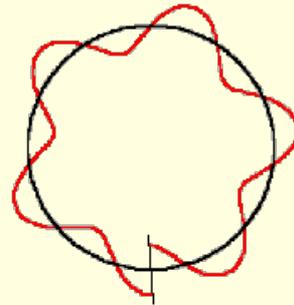
...sind eine Konsequenz der Welleneigenschaft der Elektronen.

mit $n = 1, 2, 3, \dots$ und $\lambda_n = \frac{h}{p_n}$
 \Rightarrow Umfang $2\pi r_n = n \cdot \lambda_n = n \cdot \frac{h}{p_n}$

r_n = Radius der n 'ten Elektronenbahn
 p_n = Impuls des Elektrons auf seiner n 'ten Bahn
 $\lambda_n = \frac{h}{p_n}$ = Wellenlänge des Elektrons

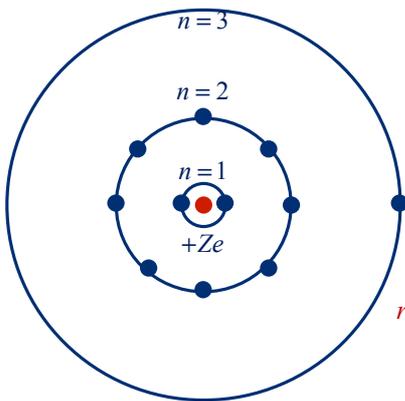


$2\pi r_n = 6 \cdot \lambda_n$
 stehende Elektronen Welle
 mit $n=6$
 \Rightarrow stabile Elektronenbahn



$2\pi r_n = 5.5 \cdot \lambda_n$
 keine stehende Elektronen Welle
 $n=5.5$ keine ganze Zahl
 \Rightarrow keine stabile Elektronenbahn

Bohr'sches Atommodell (simplistisch...)



$$r = \frac{n^2}{Z^*} \cdot a_0$$

Im Kern sind **Z Protonen** enthalten, welche die Kernladung $+Ze$ ausmachen.

Die **Coulombkraft** (elektrische Anziehung zw. Kern und Elektronen), sowie die Welleneigenschaft der Elektronen definieren die Atomhülle:

- \rightarrow Bahnradius
- \rightarrow Energie der Elektronen auf ihrer Bahn

gilt für wasserstoffähnliche Atome und Ionen, welche genau ein Elektron in der äussersten Schale besitzen.

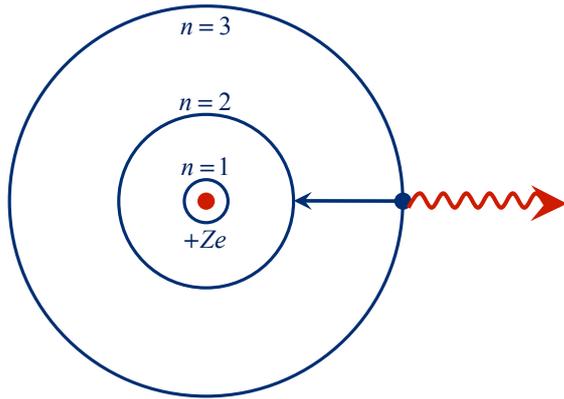
r = Atomradiusradius

$a_0 = 5.29 \times 10^{-11} \text{m}$ Bohr'scher Radius

Z^* Rumpfladung. (D.h. die Anzahl Protonen - Anzahl der Elektronen der inneren Schalen).

	Z	n	Z*	Atomradius (Grundzustand)	
Wasserstoff H	1	1	1	$r_H = 1 \cdot a_0$	$5.29 \times 10^{-11} \text{m}$
Helium He+ Ion	2	1	2	$r_H = 1/2 \cdot a_0$	$2.65 \times 10^{-11} \text{m}$
Lithium Li	3	2	1	$r_{Li} = 4 \cdot a_0$	$2.16 \times 10^{-10} \text{m}$
Natrium Na	11	3	1	$r_{Na} = 9 \cdot a_0$	$4.76 \times 10^{-10} \text{m}$

Spektrallinien



Bei Quantsprüngen springt ein Elektron von einer höheren Bahn in eine tiefere. Dabei wird ein Photon ausgesendet.

Für die **Energiedifferenz** vom n_1 -ten in den n_2 -ten Zustand erhält man gerade die Energie des emittierten Photons! → **Spektrallinien**

Berechenbar mit: Z, n_1, n_2

Für jedes Element charakteristisch!

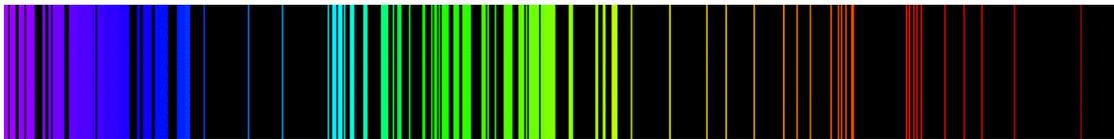
zBsp: Wasserstoff: $Z=1$

Eisen: $Z=26$

PS. Das Bohr'sche Atommodell ist zu simplistisch um alle Feinheiten der Spektrallinien zu erklären → Modernes Atommodell (Moderne Quantenmechanik)



Wasserstoff Spektrum

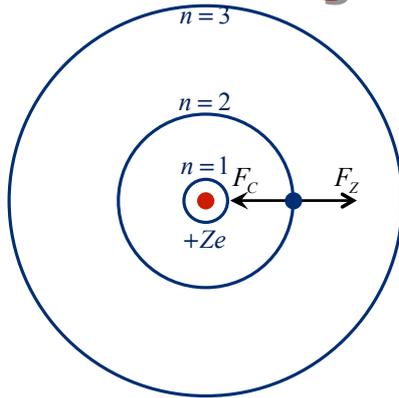


Eisen Spektrum

Für Interessierte (kein Prüfungsstoff!)

→ **Berechnung von Bahnradien und Energieniveaus**

Berechnung von Bahnradien



e Elektronen Ladung

$$e = 1,602176487 (40) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$+Ze$ Ladung des Kerns

Z =Anzahl der Protonen im Kern ist eine ganze Zahl

Für ein **kreisendes Elektron** muss die **Zentripetalkraft** gleich der **Coulombkraft** sein:

$$F_Z = F_{\text{Coulomb}}$$

$$\frac{m_e v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_n^2}$$

Verwende nun, dass Elektronen eine Welle auf ihrer Kreisbahn sind:

$$\text{Umfang} \quad 2\pi r_n = n \cdot \lambda_n = n \cdot \frac{h}{p_n} \Rightarrow r_n \cdot \underbrace{p_n}_{m_e v_n \text{ Impuls}} = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

$$\text{Und somit} \quad r_n \cdot m_e v_n = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

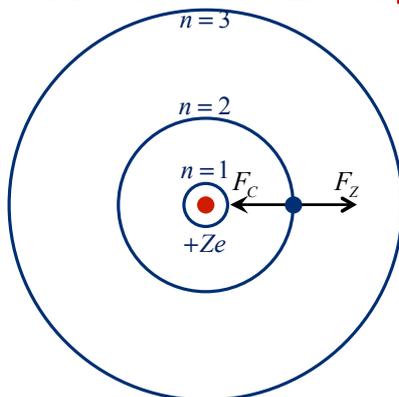
$$\text{Und damit:} \quad \underbrace{r_n^2 m_e^2 v_n^2}_{n^2 h^2 / 4\pi^2} = \frac{m_e}{4\pi\epsilon_0} r_n Z e^2 \Rightarrow r_n = \frac{n^2}{Z} \cdot \underbrace{\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e}}_{a_0}$$

$$r_n = \frac{n^2}{Z} \cdot a_0$$

mit $a_0 = 5.2918 \times 10^{-11} \text{ m}$ Bohr'scher Radius

Grösse von Atomen sowie Bahnradien sind berechenbar

Atomare Energieniveaus



Die **totale Energie** eines **kreisenden Elektrons** ergibt sich aus der Summe seiner **kinetischen** und **potentiellen Energie**.
Für ein Elektron der n -ten Bahn gilt:

$$E_n^{\text{tot}} = E_n^{\text{kin}} + E_n^{\text{pot}}$$

$$= \frac{1}{2} m_e v_n^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r_n}$$

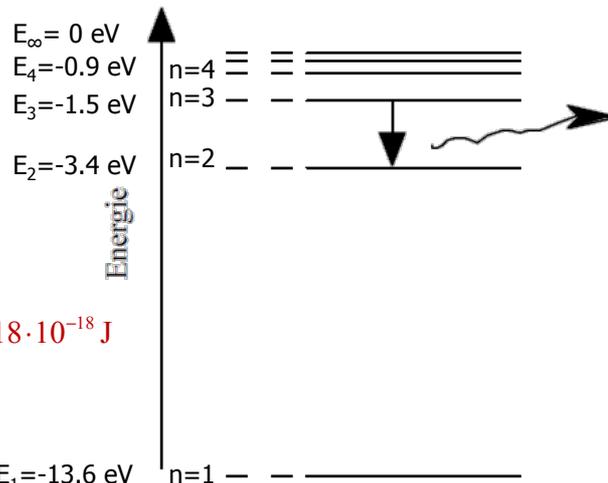
Drehimpuls ist quantisiert:

$$r_n m_e v_n = \frac{nh}{2\pi} \Rightarrow v_n = \frac{nh}{2\pi r_n m_e}$$

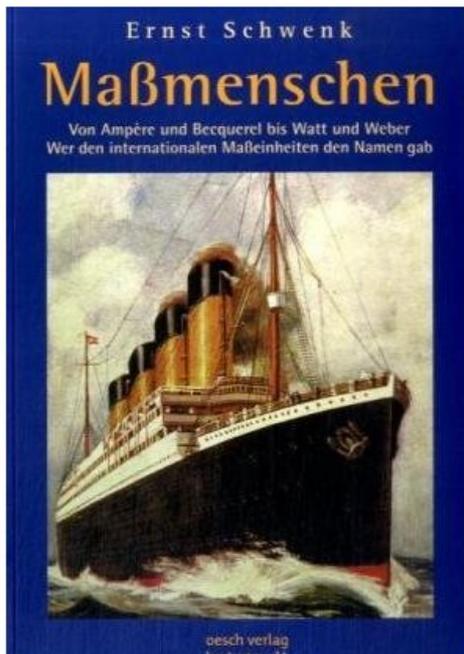
$$r_n = \frac{n^2}{Z} \cdot \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi e^2 m_e}$$

$$E_n = \frac{1}{2} m_e \left(\frac{nh}{2\pi r_n m_e} \right)^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left(\frac{Z\pi e^2 m_e}{n^2 \epsilon_0 h^2} \right)$$

$$E_n = -\frac{Z^2}{n^2} \cdot \underbrace{\frac{e^4 m_e}{2\epsilon_0^2 h^2}}_{\text{Rydberg Energie}} = -\frac{Z^2}{n^2} \cdot 13.6 \text{ eV} = -\frac{Z^2}{n^2} \cdot 2.18 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$



Kurze Biographien der SI Einheiten



Massmenschen: Von Ampère und Becquerel bis Watt und Weber / Wer den internationalen Masseinheiten den Namen gab.

Kein Physikbuch – sonder ein durchaus unterhaltsames Buch über die Personen und ihren nicht immer einfachen Lebensbedingungen, deren Namen heute Einheiten geworden sind.

Oesch Verlag; 4. Auflage (2008)
ISBN 3035020175