



Bohr

Prof. Dr. Dr. h.c. Thomas M. Klapötke

28. Oktober 2025

Anorganische Experimentalchemie

Wiederholung

1. Kinetik

Lehre von Reaktions-Geschwindigkeit und Mechanismus

2. Arrhenius Gleichung

$$k = k_0 e^{-\frac{E_A}{RT}}$$

3. Reaktionsordnungen

0. Ordnung (RG unabhängig von Konzentrationen)

1. oder 2. Ordnung (RG konzentrationsabhängig)



Beispiel für die Diskrepanz zwischen Reaktionsgleichung und Zeitgesetz:

Für die Umwandlung des Ozons in normalen Sauerstoff erwartet man

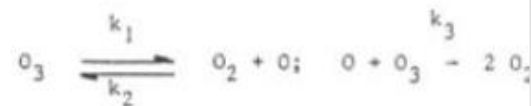


$$-\frac{dc_{\text{O}_3}}{dt} = k \cdot c_{\text{O}_3}^2$$

experimentell gefunden wurde aber:

$$-\frac{dc_{\text{O}_3}}{dt} = k' \cdot \frac{c_{\text{O}_3}^2}{c_{\text{O}_2}}$$

Dieses Zeitgesetz kann durch folgenden Reaktionsmechanismus erklärt werden
(Reaktionsmechanismus = Reihenfolge und Zusammenwirken aller Teilprozesse,
die auf das Zeitgesetz einen Einfluß haben):

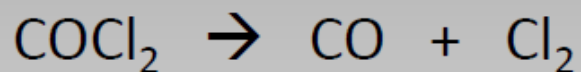


$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{c_{\text{O}_2} \cdot c_{\text{O}}}{c_{\text{O}_3}}$$

$$-\frac{dc_{\text{O}_3}}{dt} = k_3 \cdot c_{\text{O}} \cdot c_{\text{O}_3}$$

$$-\frac{dc_{\text{O}_3}}{dt} = k_3 \cdot \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{c_{\text{O}_3}^2}{c_{\text{O}_2}} = k' \cdot \frac{c_{\text{O}_3}^2}{c_{\text{O}_2}}$$

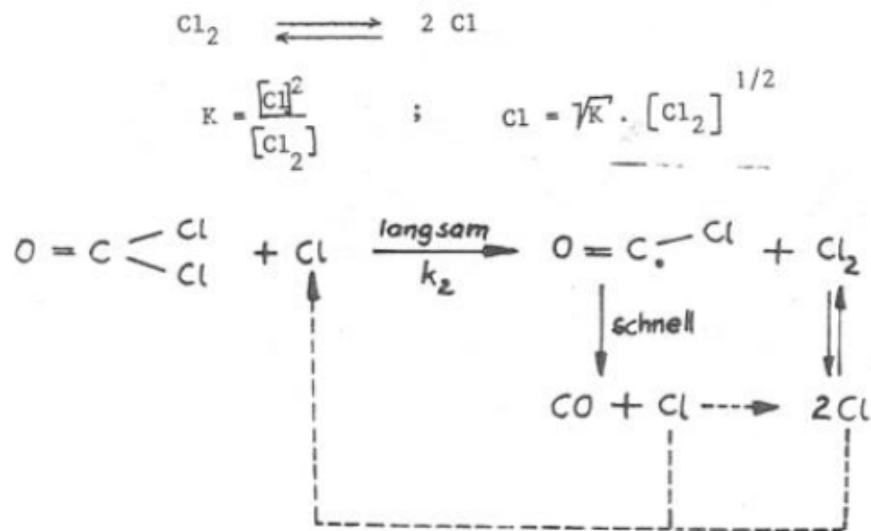
Autokatalyse:



Aus dem Experiment ergibt sich aber:

$$-\frac{d[\text{COCl}_2]}{dt} = k \cdot [\text{COCl}_2][\text{Cl}_2]^{1/2}$$

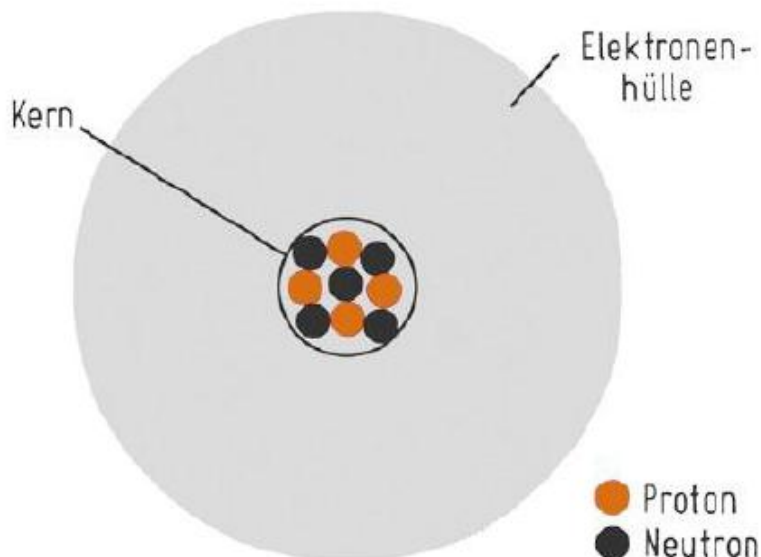
Die Ursache für diese Abweichung ist eine autokatalytische Wirkung des bei der Reaktion entstehenden Cl_2 durch eine Kettenreaktion:





Atombau

Atomarer Aufbau



Protonenzahl = Kernladungszahl = 4

Nukleonenzahl = Protonenzahl + Neutronenzahl = 9

Zahl der Elektronen = Zahl der Protonen = 4

$$e = 1.6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Elementarteilchen	Elektron	Proton	Neutron
Symbol	e	p	n
Masse	$0,9109 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ $5,4859 \cdot 10^{-4} \text{ u}$	$1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $1,007277 \text{ u}$	$1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $1,008665 \text{ u}$
	leicht	schwer, nahezu gleiche Masse	
Ladung	$-e$ negative Elementarladung	$+e$ positive Elementarladung	keine Ladung neutral

Tabelle 1.1 Eigenschaften von Elementarteilchen

Elementarteilchen	Elektron	Proton	Neutron
Symbol	e	p	n
Masse	$0,9109 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$ $5,4859 \cdot 10^{-4} \text{ u}$ leicht	$1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $1,007277 \text{ u}$ schwer, nahezu gleiche Masse	$1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $1,008665 \text{ u}$
Ladung	$-e$ negative Elementarladung	$+e$ positive Elementarladung	keine Ladung neutral

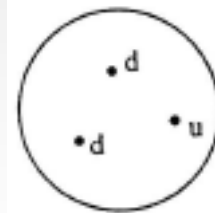
Tab. 5 Atombausteine, -kerne und -hüllen

(Z = Kernladung, m = Massenzahl, A_r = relative Atommasse, N_A = Avogadro'sche Konstante^{a)})

Teilchen	Masse		Ladung		Radius ^{b)}	Dichte
	relativ ($^{12}\text{C} = 12$)	absolut [kg]	[in Coulomb]	[in e]	[ca.. in m]	[ca.. in g/cm ³]
Elektron	0.000548580	9.109534×10^{-31}	$-1.602189 \times 10^{-19}$	-1	$< 10^{-19}$	$\geq 10^{14}$
u-Quark	0.322	0.535×10^{-27}	$+1.068126 \times 10^{-19}$	$+2/3$	$< 10^{-19}$	$\geq 10^{14}$
d-Quark	0.322	0.535×10^{-27}	$-0.534063 \times 10^{-19}$	$-1/3$	$< 10^{-19}$	$\geq 10^{14}$
Proton	1.007276 ^{c)}	1.672649×10^{-27}	$+1.602189 \times 10^{-19}$	+1	1.3×10^{-15}	2×10^{14}
Neutron	1.008665 ^{c)}	1.674954×10^{-27}	± 0	± 0	1.3×10^{-15}	2×10^{14}
Atomkern	$A_r - Z/1836$	$(A_r - Z/1836) : N_A$	$+1.6 \times 10^{-19} \times Z$	$+Z$	$1.3 \times 10^{-15} \times \sqrt[3]{m}$	2×10^{14}
Atomhülle	$Z/1836$	$(Z/1836) : N_A$	$-1.6 \times 10^{-19} \times Z$	$-Z$	um 2×10^{-10}	$2 \times 10^{-4} \times Z$



Proton



Neutron

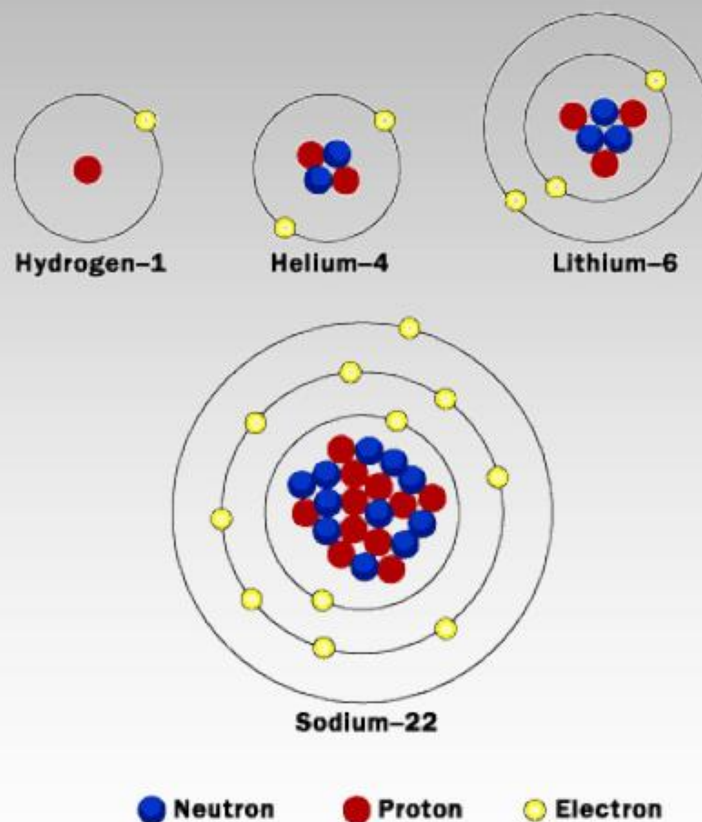
a) $N_A = 6.022045 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. b) Plancksche Elementarlänge = $1.617 \times 10^{-35} \text{ m}$. c) Ein Proton ist 1836.151mal, ein Neutron 1838.683mal schwerer als ein Elektron.

Das Bohr'sche Atommodell



Niels Bohr (1885-1962)

Isotopes of Hydrogen, Helium, Lithium and Sodium



Aussage: Elektronen befinden sich auf
Kreisbahnen um die Atomkerne !

$$E_{\text{pot}} = V = \int_r^{\infty} F_C dr$$

$$F_C = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\Rightarrow V = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \int_r^{\infty} \frac{1}{r^2} dr = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

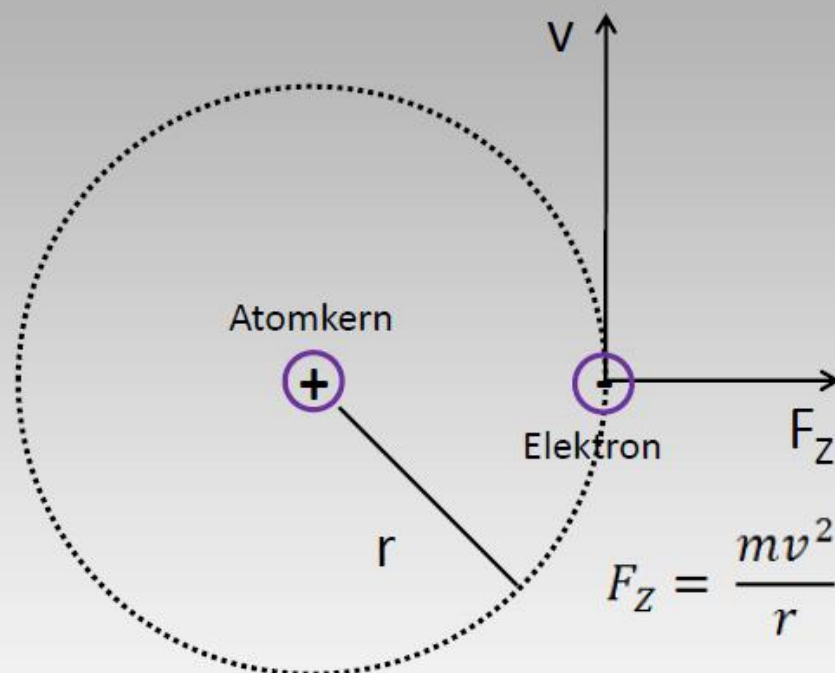
$$E_{\text{kin}} = T = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E = T + V = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$F_Z = -F_C: \quad \frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\Rightarrow mv^2 = \frac{+e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r}$$



$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Plancksches Wirkungsquantum

$$v = \frac{nh}{2\pi mr}$$

$$F_C = -F_Z: \quad \frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\text{mit: } v = \frac{nh}{2\pi mr}$$

$$\Rightarrow \frac{mn^2h^2}{r4\pi^2m^2r^2} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$



$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2}$$

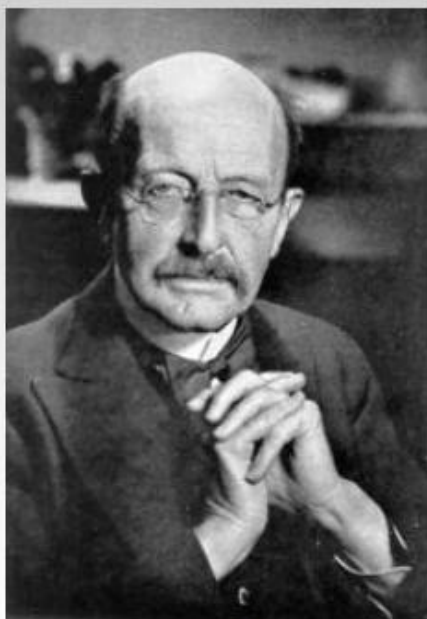
$$r = n^2 \cdot 0.53 \text{ \AA}$$

$$r \sim n^2$$

Lichtquanten

$$E = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^4 m}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$$

1900, Planck:

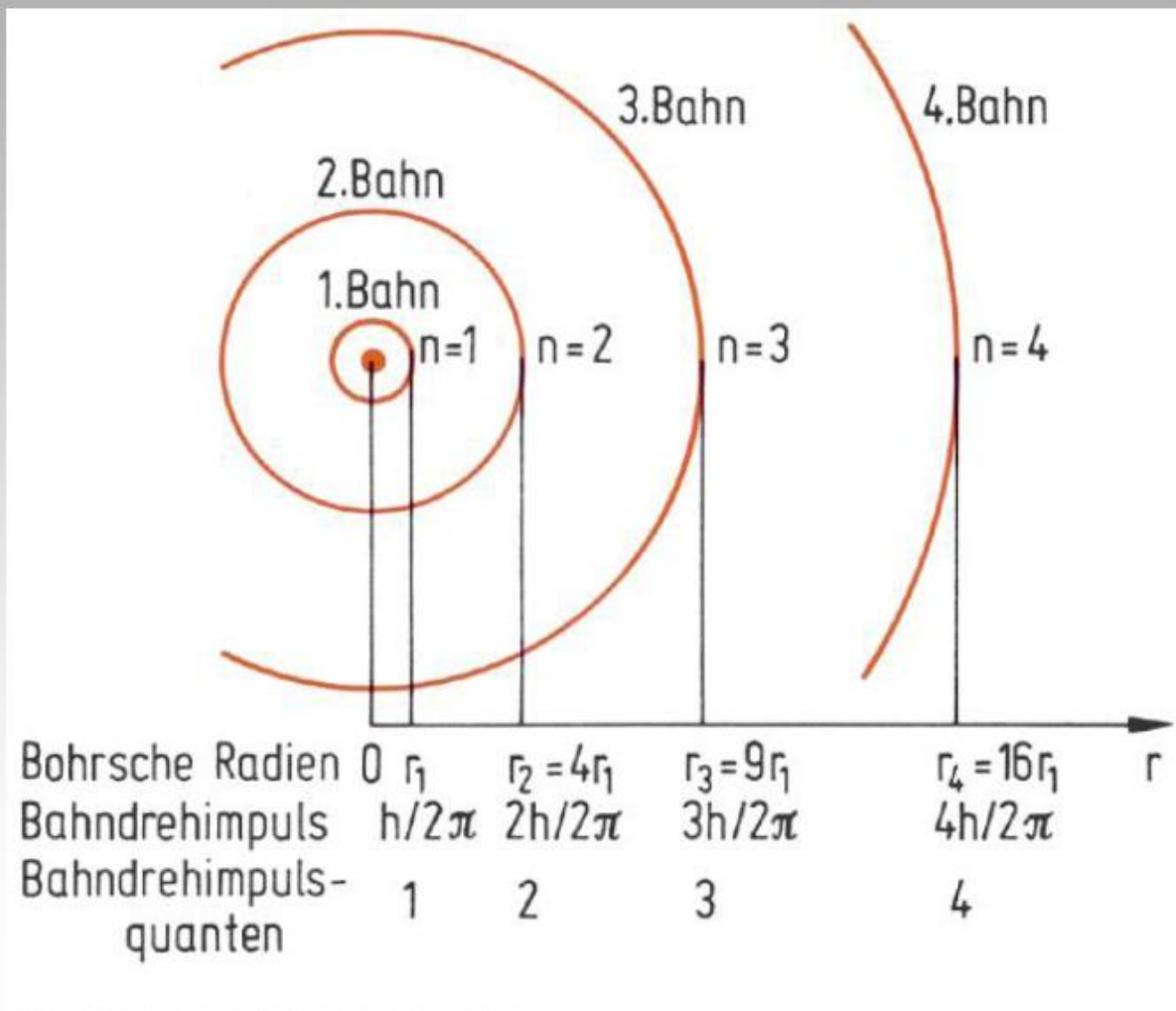


Max Planck (1858-1947)

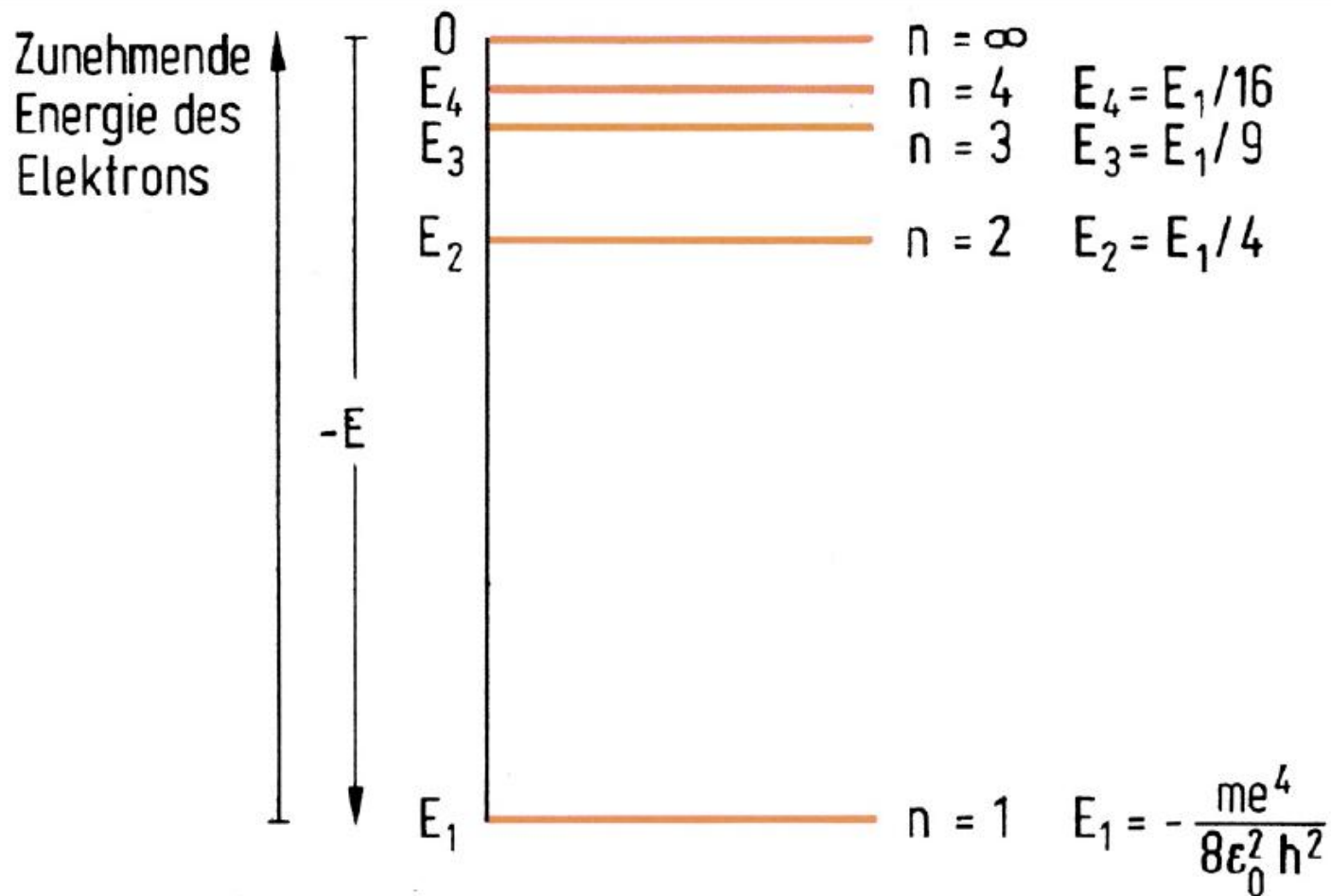
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$c = \lambda\nu$$

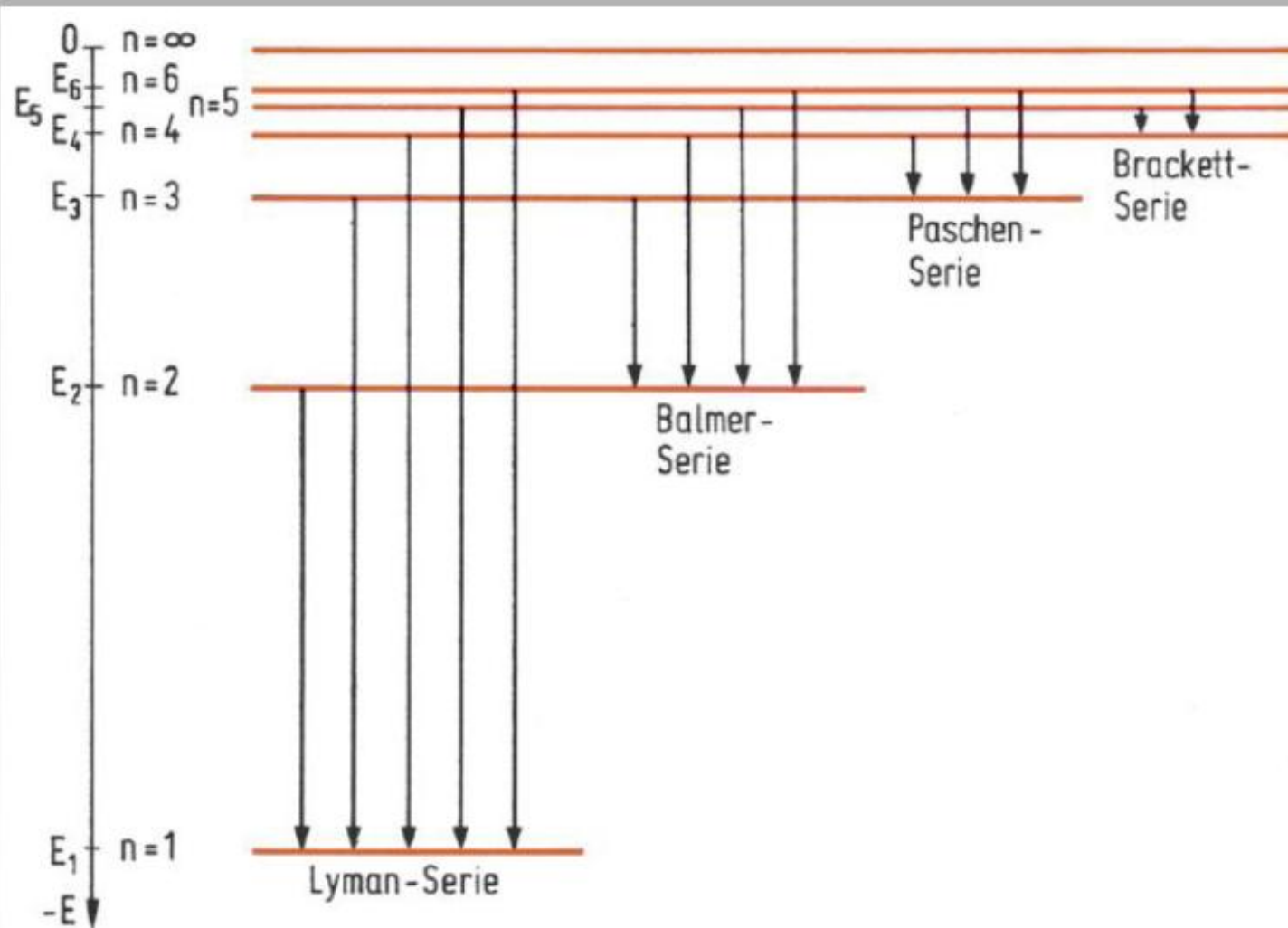
$$\Delta E = -\frac{me^4}{8h^2 \epsilon_0^2} \left[\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right]$$



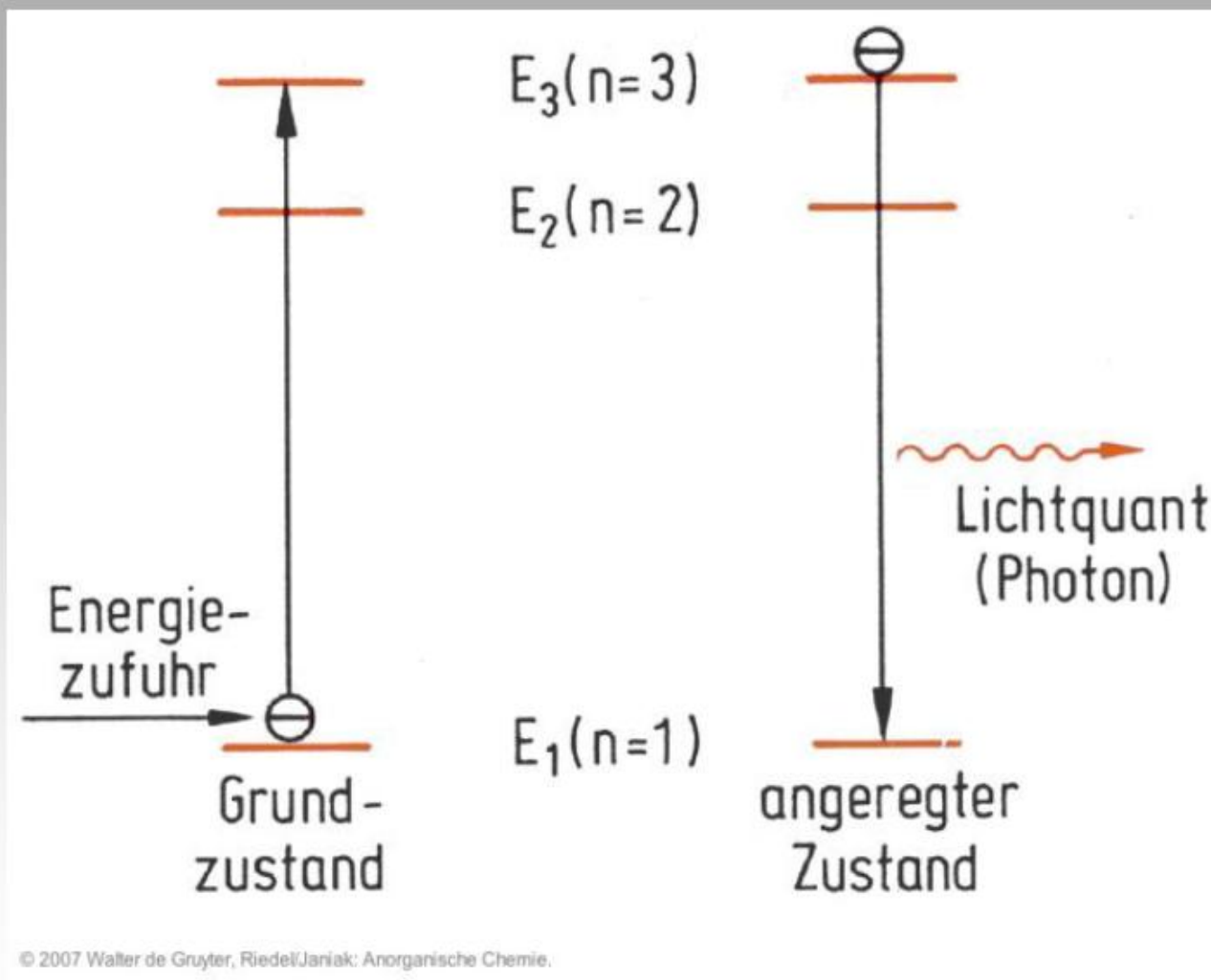
© 2007 Walter de Gruyter, Riedel/Janiak: Anorganische Chemie.



© 2007 Walter de Gruyter, Riedel/Janiak: Anorganische Chemie.



© 2007 Walter de Gruyter, Riedel/Janiak: Anorganische Chemie.



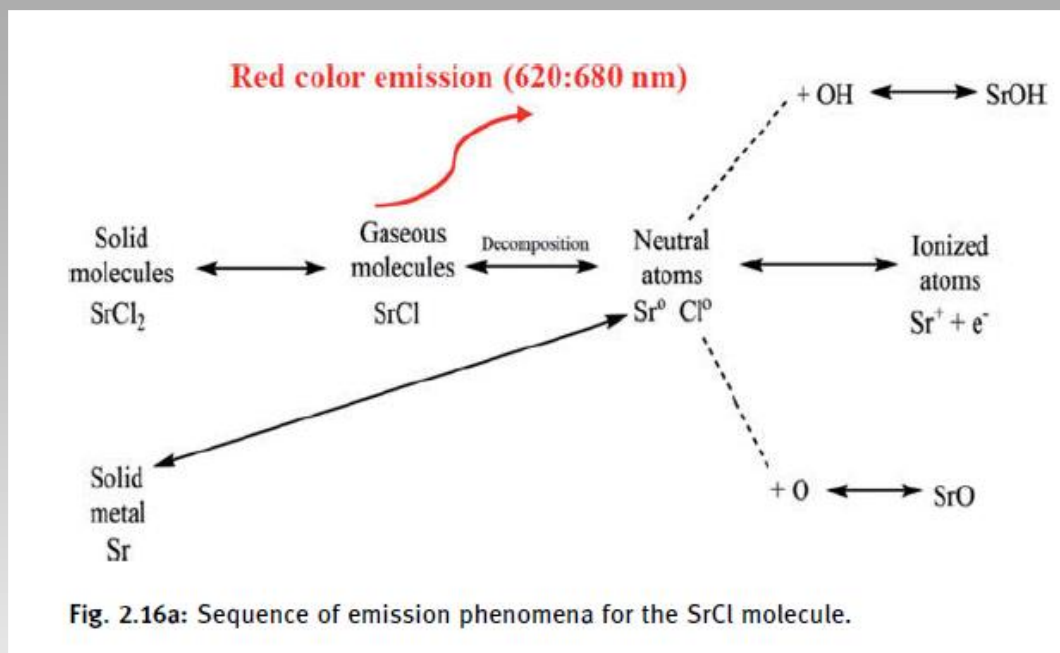
Versuch: Flammenfärbungen von Elementen

Table 1: Wavelength ranges of spectral colors.

Color	Wavelength [nm]
infrared	> 700
red	700–610
yellow	610–570
green	570–500
blue	500–450
violet	450–400
ultraviolet	< 400

Table 2: Spectra of atoms and simple molecules of interest in pyrotechnics. Values are taken from references [18–20].

Element	Emitting species	λ [nm]	Color
lithium	atomic Li	670.8	red
		460	blue
		413	violet
		497	bluish-green
		427	violet
sodium	atomic Na	589.0, 589.6	yellow
copper	CuCl	420-460	violet-blue
		510-550	green
strontium	SrCl	661.4, 662.0, 674.5, 675.6	red
	SrCl	623.9, 636.2, 648.5	orange
	SrCl	393.7, 396.1, 400.9	violet
	SrOH	605.0, 646.0	orange
		659.0, 667.5, 682.0	red
barium	atomic Sr	460.7	blue
	BaCl	507, 513.8, 516.2, 524.1, 532.1,	green
		649	red
	BaOH	487,	greenish-blue
		512	green
	BaO	604, 610, 617, 622, 629	orange
	atomic Ba	553.5,	green
		660	red



The emission in pyrotechnic compositions generally originates from one of the four following sources:

- Atomic (elemental) emission (e.g. Na) → line spectrum,
- Molecular emission (e.g. BaCl, SrOH) → band spectrum,
- Incandescence → continuous spectrum,
- Luminescence → band spectrum.

Table 3: Some colored flare compositions by wt%.^[9]

Ingredient	Red Navy	Red Highway	Green Navy	Yellow Navy
Mg	24.4		21.0	30.3
KClO ₄	20.5	6.0	32.5	21.0
Sr(NO ₃) ₂	34.7	74.0		
Ba(NO ₃) ₂			22.5	20.0
PVC	11.4		12.0	
Na ₂ C ₂ O ₄				19.8
Cu powder			7.0	
Asphaltum	9.0			3.9
Binder		10.0	5.0	5.0
S ₈		10.0		

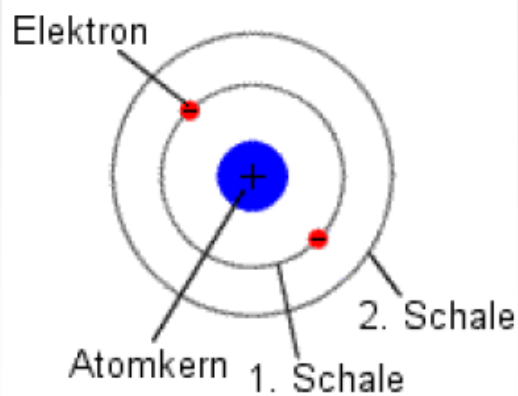
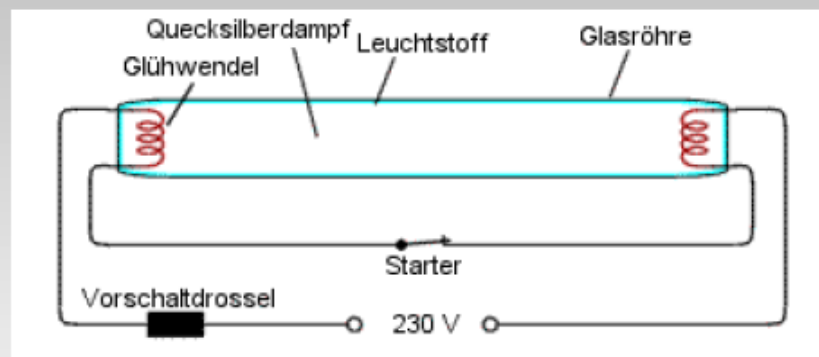
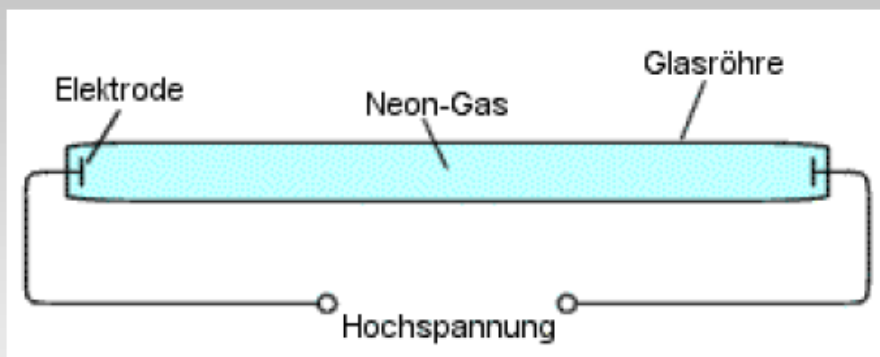


Versuch: Gasentladungsröhren

Neonlampen



Leuchtstofflampen



Linienspektrum

Licht mit einer Wellenlänge von ca. 185 und 254 nm trifft auf Leuchtstoff