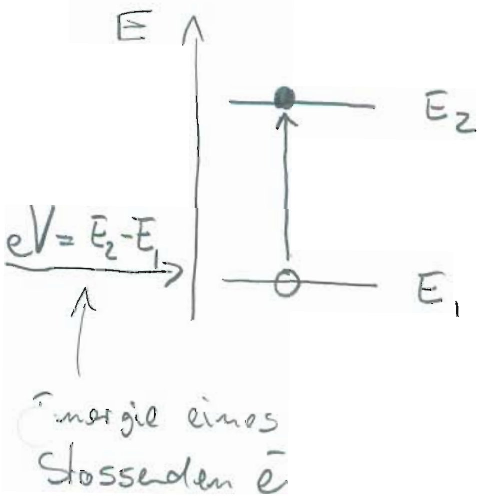
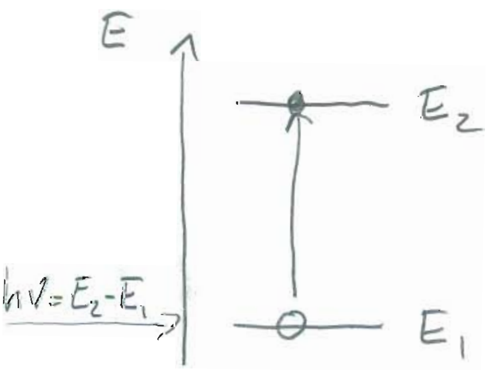
Anregung von Atomen

- durch Stoss mit anderen Atomen oder mit Elektronen

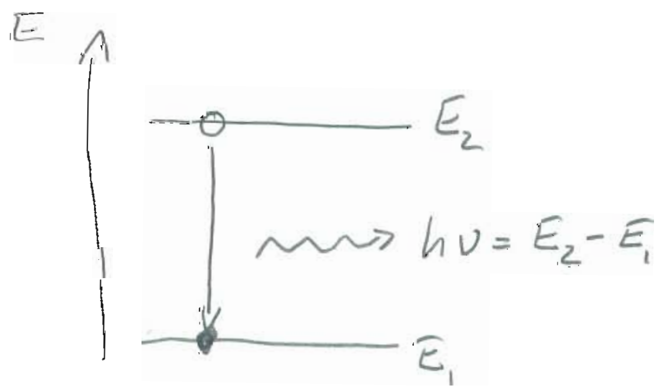


- durch Absorption von Photonen



Zerfall von angeregten elektronischen Zuständen in Atomen

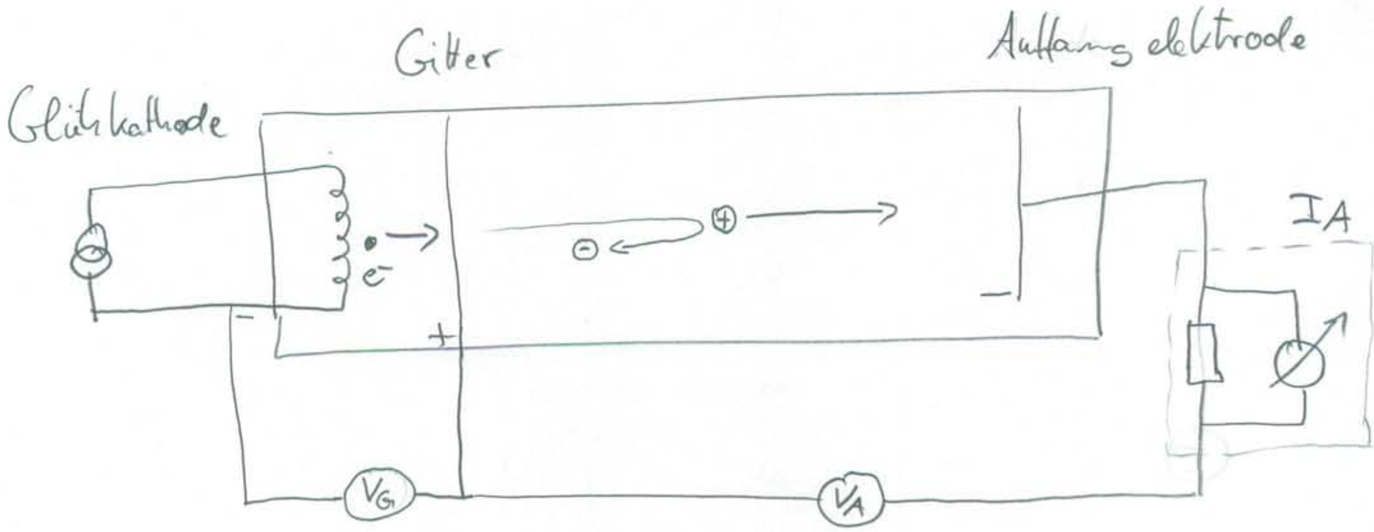
- spontane Emission (Vakuumfluktuationen)
- induzierte Emission (Photonen)
- Stösse (Elektronen, Atome)



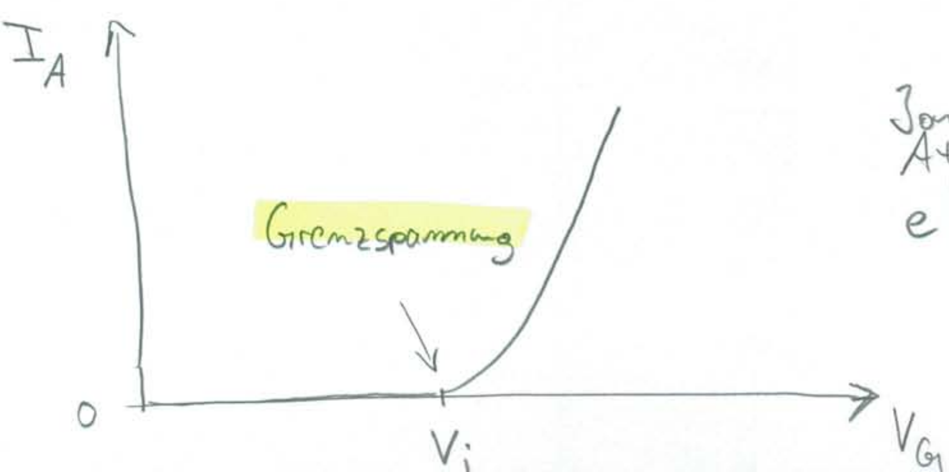
Nicht spektroskopische Methoden zur Bestimmung diskreter Energieniveaus der Elektronen in Atomen

Stossionisation

- Ionisation von Atomen durch Stoss mit Elektronen



Aufbau:
- thermische Emission von e^- an Glühkathode
- Beschleunigung der e^- durch positive Spannung am Gitter V_G
- Ionisation von Atomen durch e^--Stoss
- positiv geladene Ionen werden an Auffangelektrode als Strom detektiert
- e^- werden am Gitter aufgefangen

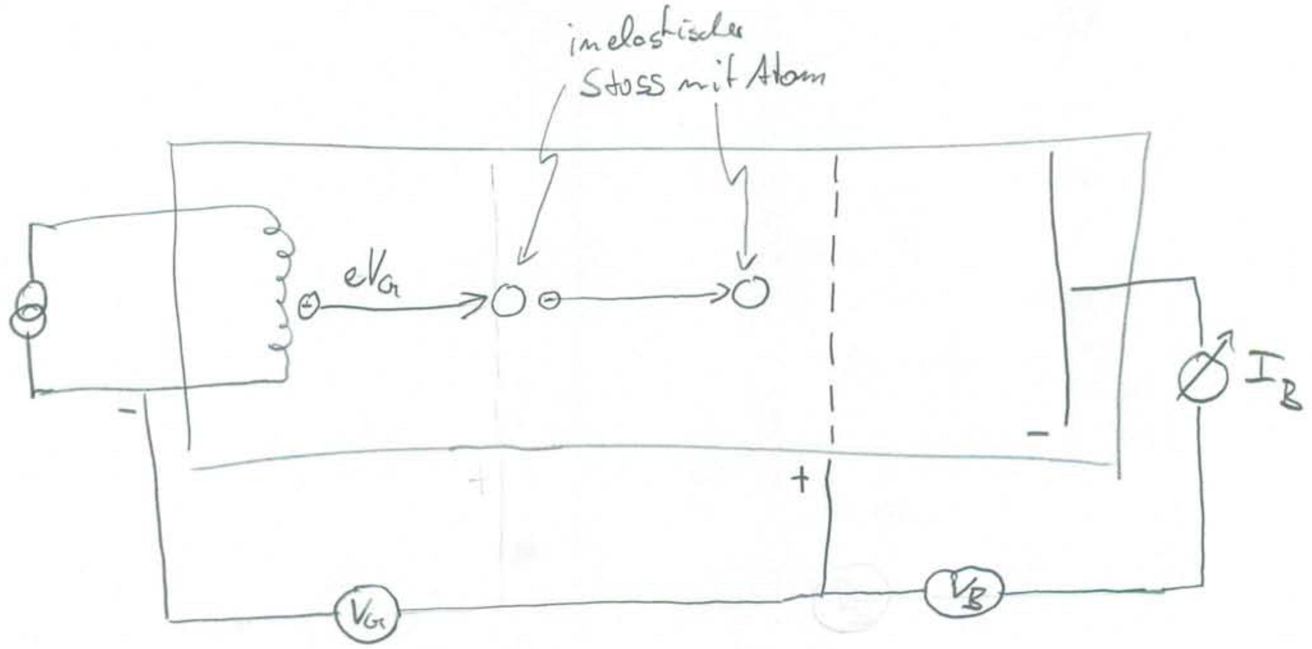


Ionisationsenergie des Atoms:

$eV_i = E_i$

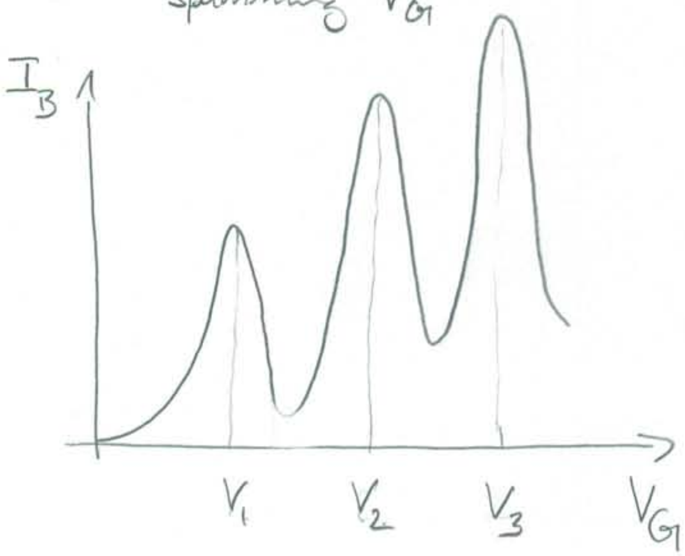
Das Franck-Hertz Experiment

- Demonstration der quantisierten Absorption von Energie in Stössen zwischen Atom und Elektron



Beschleunigung von e^- mit variabler Spannung V_G

Messung des Elektronen-Stroms I_B bei kleiner Bremsspannung V_B



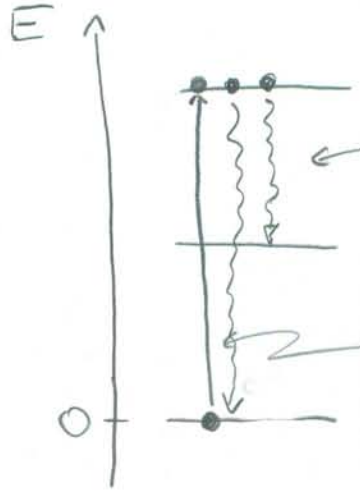
⇒ Elektronenstrom gibt Aufschluss über das Anregungsspektrum des Atoms

$V_G < V_1$: elastische e^- - Atom Stösse

$V_1 < V_G < V_2$: ein inelastischer e^- - Atom Stoss

$V_2 < V_G < V_3$: zwei inelastische e^- - Atom Stösse

– Erzeugung von elektromagnetischer Strahlung im Franck-Hertz Experiment

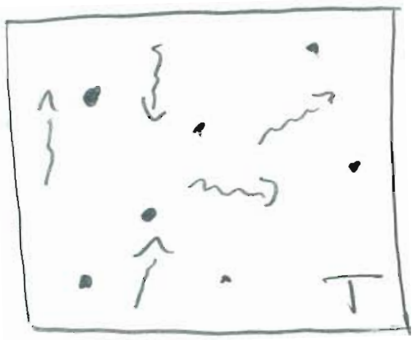


Zerfall durch Strahlungs-emission: emittierte Energie $h\nu$

Anregung durch Elektronenstoss: absorbierte Energie eV_G

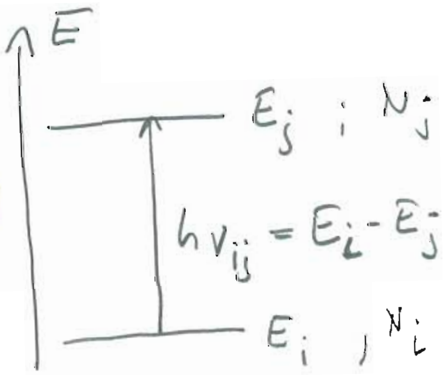
$\Rightarrow$ Konsistente Ergebnisse bei detaillierter Untersuchung der absorbierten (Stösse) und emittierten Energie (Spektroskopie)

Absorption, spontane und induzierte Emission im thermischem Gleichgewicht



betrachte N Atome im thermischen Gleichgewicht mit einem Strahlungsfeld der Energiedichte $u(\nu)$ bei Temperatur T

- Atome mit Energieniveaus E_i und E_j und Übergangsfrequenz
  $$\nu_{ij} = \frac{E_j - E_i}{h}$$

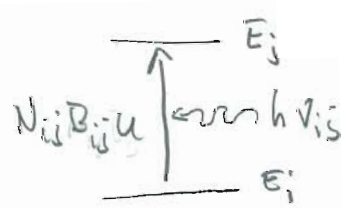


- N_i : Anzahl der Atome im Zustand E_i

  N_j : Anzahl der Atome im Zustand E_j

  $N = N_i + N_j$: Gesamtzahl der Atome

- Anzahl N_{ij} der Atome, die durch Wechselwirkung mit dem Strahlungsfeld u einen Übergang von E_i nach E_j durch Absorption eines Photons machen



$$N_{ij} = N_i \, B_{ij} \, u(\nu_{ij})$$

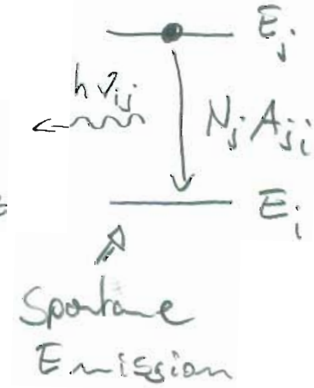
B_{ij} : Absorptionswahrscheinlichkeit eines Atoms (Einstein B-Koeffizient)

proportional zur Zahl der Photonen bei Frequenz ν_{ij}

- Anzahl der Atome, die einen Übergang von E_i nach E_j durch spontane oder induzierte Emission machen

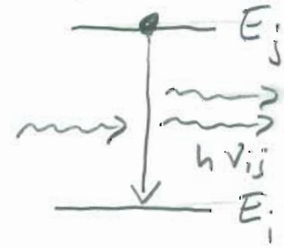
$$N_{ji} = N_j \left(A_{ji} + B_{ji} \, u(\nu_{ij}) \right)$$

A_{ij} : Einstein A-Koeffizient:
Wahrscheinlichkeit, daß ein Atom spontan ein Photon der Frequenz ν_{ij} emittiert



B_{ji} : Einstein B-Koeffizient:
Wahrscheinlichkeit, daß ein Atom durch Wechselwirkung mit einem Photon zur Emission eines weiteren Photons stimuliert wird.

stimulierte Emission ⇒



- Im thermischen Gleichgewicht ist die Zahl der emittierenden und absorbierenden Atome identisch

$$\boxed{N_{ij} = N_{ji}}$$

- daraus ergibt sich für die Energiedichte des Feldes

$$\boxed{u(\nu_{ij}) = \frac{A_{ji}}{B_{ji}} \frac{1}{\frac{N_i}{N_j} \frac{B_{ij}}{B_{ji}} - 1}}$$

- mit der Zahl der Atome im Grundzustand E_i gegeben durch die klassische Boltzmannverteilung

$$N_i = C\, e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

und im angeregten Zustand E_j

$$N_j = C\, e^{-\frac{E_j}{k_B T}}$$

ergibt sich

$$\frac{N_i}{N_j} = e^{\frac{E_j - E_i}{k_B T}} = e^{\frac{h\nu_{ij}}{k_B T}}$$

- mit gleichen Wahrscheinlichkeiten für die Absorption und die stimulierte Emission

$$\boxed{B_{ij} = B_{ji}}$$

findet man

$$\boxed{u(\nu_{ij}) = \frac{A_{ji}}{B_{ji}} \frac{1}{e^{\frac{h\nu_{ij}}{k_B T}} - 1}}$$

Planck'sches Strahlungsgesetz nach Einstein

- Verhältnis von spontaner zu stimulierter Emission

$$\boxed{\frac{A_{ji}}{B_{ji}} = \frac{8\pi h \nu_{ij}^3}{c^3}}$$

Modendichte * Energie pro Mode

⇒ starke Frequenzabhängigkeit der spontanen Emission

→ spontane Emission ist stimuliert durch Vakuumfluktuationen

Bemerkungen: - Drei fundamentale Prozesse kontrollieren die Wechselwirkung von Licht und Atomen

- spontane Emission
- Absorption
- stimulirte Emission

- Diese Phänomene erklären die Struktur des Planck'schen Strahlungsgesetzes.

- Stimulierte Emission wird in LASERn zur Erzeugung von kohärentem Licht eingesetzt

Rydberg - Atome

Atome bei denen sich ein einzelnes e^- in einem Zustand mit einer sehr grossen Hauptquantenzahl ($n > 20$) befindet.

Eigenschaften

- grosse Bahnradien des e^- $\quad \boxed{r_n = r_1 n^2}$

  ↳ $n = 100 \Rightarrow r_n \sim 500$ nm

  ↳ Atom ist 10^4 mal grösser als gewöhnliches Wasserstoff-Atom

- Rydberg-Atome beliebiger Elemente haben Eigenschaften ähnlich dem Wasserstoff-Atom

  ↳ e^- bewegt sich effektiv im Feld des einfach ionisierten Atoms

- grosse Dipolmomente $\quad \boxed{d \sim e r_n \propto \underbrace{e r_1}_{\text{Dipolmoment des Wasserstoff-Atoms}} n^2}$

  ↳ sehr starke Wechselwirkung mit Photonen

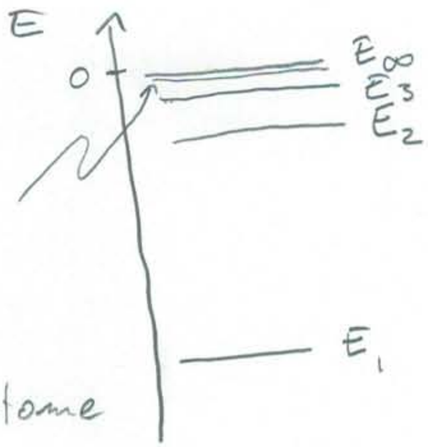
- kleine Übergangsfrequenzen

$$\boxed{\nu \sim \frac{R_y}{h} \frac{2}{n^3}} \Rightarrow \nu \Big|_{n=100} = 6.6 \text{ GHz}$$

- lange Lebensdauern

  ⇒ bis zu Sekunden $\tau \sim 1s$

- leicht ionisierbar



  ⇒ $E_n \sim \frac{1}{n^2}$

  ⇒ einfache Detektion der ionisierten Atome

- Erzeugung durch Wechselwirkung mit Photonen geeignet gewählter Frequenz

- Detektion mit Sekundärelektronen-Vervielfachern

<u>Anwendung</u>: Grundlagenforschung zur Untersuchung der Wechselwirkung einzelner Photonen mit einzelnen Atomen

Das Korrespondenzprinzip

Die Vorhersagen vom quantenmechanischen Modellen stimmen im Grenzfall hoher Quantenzahlen mit denen der klassischen Modelle überein.

Beispiel: Übergangsfrequenz im Wasserstoff-Atom

QM:

$$\nu_{if} = \frac{Ry}{h}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

für benachbarte Zustände

$$n_f = n_i - 1$$

$$\boxed{\nu_{if}} = \frac{Ry}{h}\left(\frac{1}{(n_i-1)^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$\approx \boxed{\frac{Ry}{h}\,\frac{2}{n_i^3}}$$

klassisch: Frequenz der Dipolstrahlung des e^- auf Umlaufbahn

$$\nu = \frac{1}{T}$$

$$\nu = \frac{v}{2\pi r_n} = \boxed{\frac{Ry}{h}\,\frac{2}{n^3}} \Rightarrow$$ identisch mit QM Resultat

mit $$v = \frac{e}{\sqrt{4\pi\varepsilon_0\, m\, r_n}}$$

und $$r_n = \frac{n^2 h^2 \varepsilon_0}{\pi m e^2}$$

T: Umlaufzeit