

London-Kräfte und Quantenfluktuationen

Yehor Ivko

Klasse 10a

Johannes-Kepler-Gymnasium

Einleitung

„Stellt euch mal vor: Zwei Atome, völlig neutral, keine Ladung – aber sie ziehen sich plötzlich an. Warum?“

Die Standarderklärung lautet: „Durch die zufällige Bewegung der Elektronen entstehen temporäre Dipole, die sich anziehen.“

Aber wenn es wirklich nur Zufall wäre — warum bleibt dann am Ende eine **Nettoanziehung** übrig?

1. Rückblick: Elektrische Kräfte

- Coulomb-Kraft zwischen Punktladungen
- Elektrisches Feld: Raum, in dem Ladungen Kräfte erfahren
- Potentielle Energie hängt vom Abstand ab

2. Herleitung der London-Kräfte

Schritt 1: Oszillierender Dipol

$$\vec{p}_1(t) = p_0 \cos(\omega t)$$

Schritt 2: Elektrisches Feld eines Dipols

$$\vec{E}_1(t) \propto \frac{\vec{p}_1(t)}{r^3}$$

Schritt 3: Induzierter Dipol

$$\vec{p}_2(t) = \alpha \vec{E}_1(t) \propto \alpha \cdot \frac{\vec{p}_1(t)}{r^3}$$

Schritt 4: Wechselwirkungsenergie zweier Dipole

$$U(t) \propto -\frac{\vec{p}_1(t) \cdot \vec{p}_2(t)}{r^3} = -\frac{\alpha}{r^6} |\vec{p}_1(t)|^2$$

Schritt 5: Zeitmittelwert

$$\langle U \rangle \propto -\frac{\alpha p_0^2}{2r^6}$$

Fazit: Auch wenn die Dipole temporär sind, ergibt sich im Mittel eine Anziehungskraft, die mit $\frac{1}{r^6}$ abfällt.

3. Was ist ein Potential?

- Zeigt, wie viel Energie ein Zustand hat — je niedriger, desto stabiler
- Beispiel: Lennard-Jones-Potential

$$U(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

- Erste Term: Abstoßung (Pauli-Prinzip), zweiter Term: Anziehung (London-Kräfte)

4. Quantenmechanik erklärt den Ursprung

- Warum entstehen überhaupt diese Dipole?
- Klassisch: Ein Atom ohne Dipol bleibt dipolfrei.
- Quantenmechanisch: Es gibt immer **Fluktuationen** — auch im Vakuum.
- Ursache: Die **Unschärferelation** zwischen Energie und Zeit.

Heisenbergsche Energie-Zeit-Unschärferelation

$$\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \frac{\hbar}{2}$$

Diese Beziehung erlaubt es, für kurze Zeiten Energie zu „leihen“. Deshalb kann ein Dipol für kurze Zeit entstehen, auch wenn er klassisch nicht erlaubt wäre.

5. Fazit

- Die London-Kräfte beruhen auf temporären Dipolen.
- Diese entstehen durch Quantenfluktuationen — sogar im Vakuum.
- Die scheinbar zufällige Bewegung der Elektronen ist in Wirklichkeit eine Folge der Quantenmechanik.
- Das führt zu einer stabilen, durchschnittlichen Anziehung zwischen Molekülen.

Optional: Weiterführende Themen

- Casimir-Effekt: Anziehung zwischen Metallplatten im Vakuum
- Pfadintegrale und virtuelle Teilchen
- QED: Van-der-Waals-Kräfte aus Sicht der Quantenfeldtheorie