

Atlanten der Physik



Kindle-Buch:

<https://www.amazon.de/dp/B086N1R1YC>

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

1. Das leere Atom



Abb. 14: Frauenkirche im Atom, Zeichnung von 1955.
Foto: DMA, BA TiB 146.

Atomkern im Vergleich zur Atomhülle klein und schwer.

Elektron ist punktförmig.

Von dem Platz, den das Atom besetzt, wird nur ein winziger Anteil, der dem Kernvolumen entspricht, von Materie eingenommen.

1. Das leere Atom

Ein Atom besteht somit zum größten Teil aus leerem Raum, der von einem winzigen Kern und von (punktförmigen) Elektronen bevölkert wird.

1. Das leere Atom

Ein Atom besteht somit zum größten Teil aus leerem Raum, der von einem winzigen Kern und von (punktförmigen) Elektronen bevölkert wird.

„richtig“ wenn: Elektron als kleine Individuen.

Sie bewegen sich ohne eine Bahn zu durchlaufen. *Sie schwirren.*

Aufenthaltswahrscheinlichkeit

Ein Atom besteht somit zum größten Teil aus leerem Raum, der von einem winzigen Kern und von (punktförmigen) Elektronen bevölkert wird.

„richtig“ wenn: Elektron als kleine Individuen.

Sie bewegen sich ohne eine Bahn zu durchlaufen. *Sie schwirren.*

Aufenthaltswahrscheinlichkeit

andere Vorstellung vom Elektron im Atom:

Es nimmt den Raum ein, den seine Zustandsfunktion einnimmt.

Danach ist das Elektron so groß, wie das ganze Atom.

Atom nicht leer - aus einem Stoff sehr geringer Massendichte.

1. Das leere Atom

Ein Atom besteht somit zum größten Teil aus leerem Raum, der von einem winzigen Kern und von (punktförmigen) Elektronen bevölkert wird.

andere Vorstellung vom Elektron im Atom:

Es nimmt den Raum ein, den seine Zustandsfunktion einnimmt.

Danach ist das Elektron so groß, wie das ganze Atom.

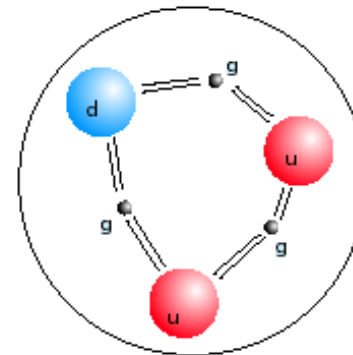
Atom nicht leer - aus einem Stoff sehr geringer Massendichte.

Die ganze Welt bestünde aus leerem Raum.

„richtig“ wenn: Elektron als kleine Individuen.

Sie bewegen sich ohne eine Bahn zu durchlaufen. *Sie schwirren.*

Aufenthaltswahrscheinlichkeit



1. Das leere Atom

- Die Hülle besteht aus punktförmigen Körperchen
- Der Kern ist eine Art kompaktes Fluidum

Was man wollte:

Masse des viel kleineren Kerns ist viel größer als die große Hülle.

Aber :

Masse ist nur eine von mehreren extensiven Größen

Man sollte auch sagen:

El. Ladung von Hülle und Kern sind gleich.

Drehimpuls von Hülle und Kern sind von gleicher Größenordnung.

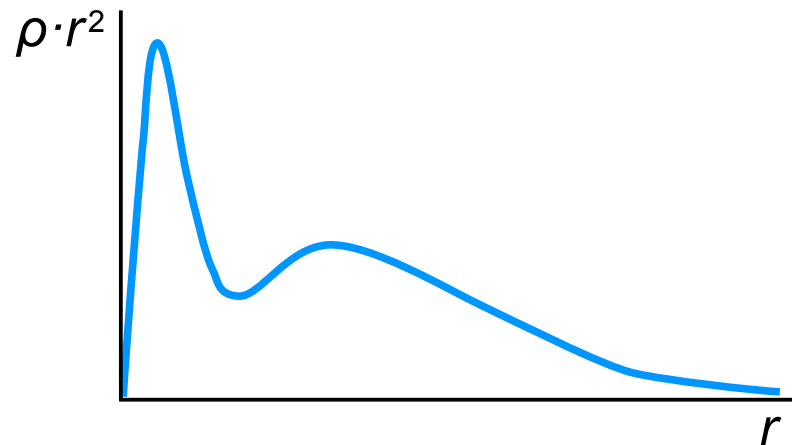
Magnetische Moment der Hülle viel größer, als das des Kerns.

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

2. Das Schalenmodell

Zur Erklärung bestimmter Eigenschaften der Atome (Periodizität von Atomradien und Ionisierungsenergien) benutzt man das Schalenmodell.

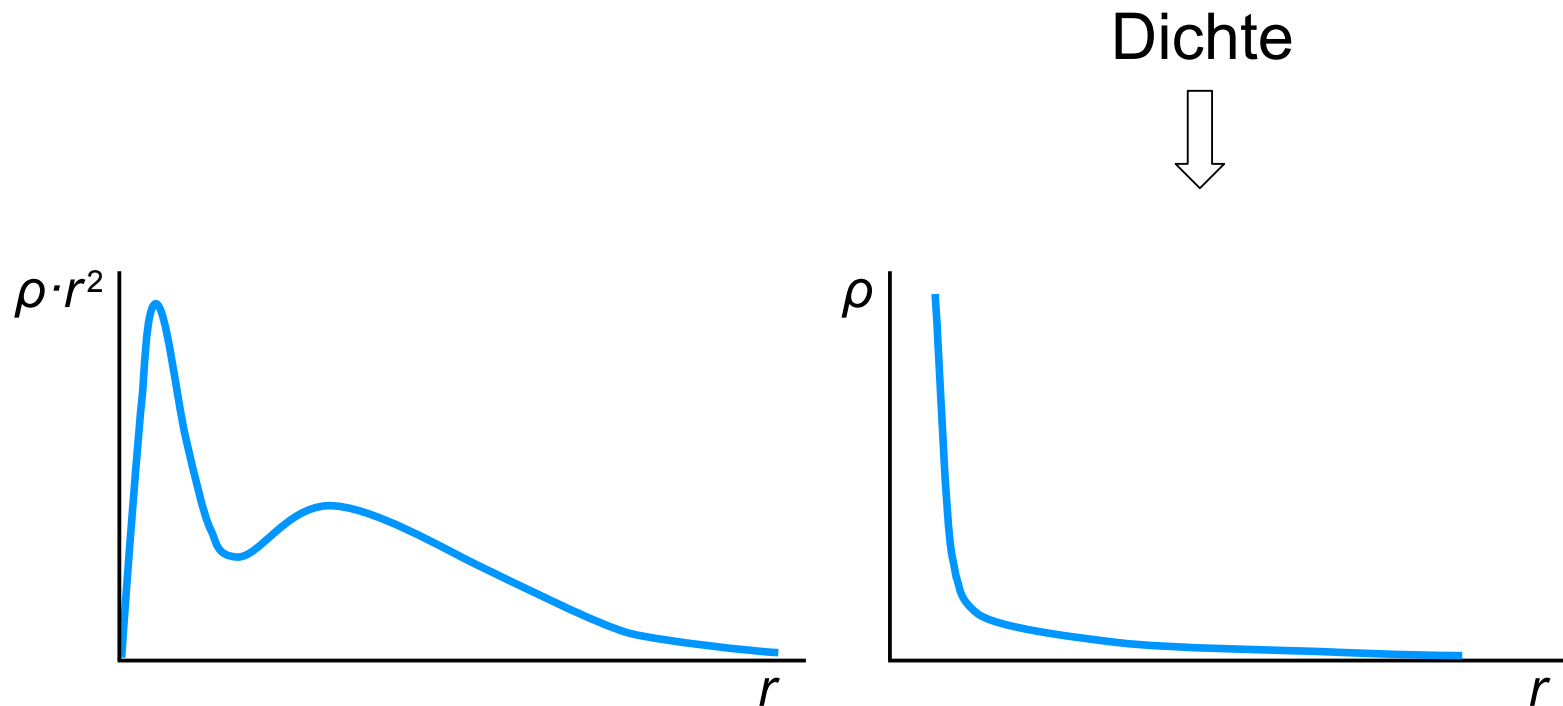
Die Existenz der Schalen untermauert man durch eine Abbildung:



2. Das Schalenmodell

Was ist hier dargestellt?

Nicht die Dichte $\rho(r)$, sondern die Funktion $r^2 \cdot \rho(r)$



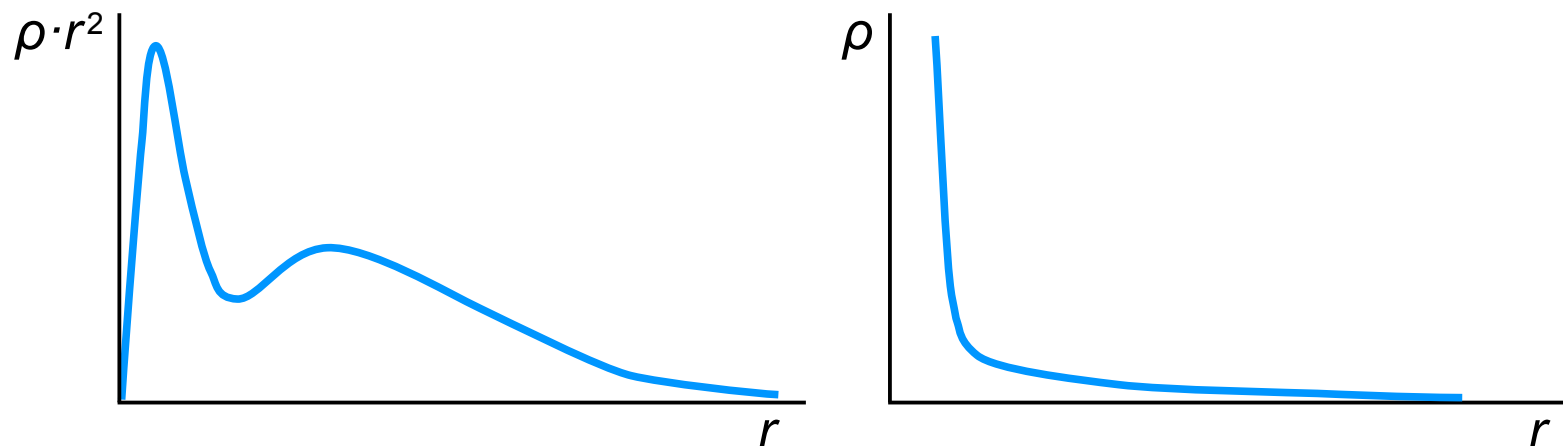
2. Das Schalenmodell

Dichte $\rho(r)$:

- Maximum am Ort des Kerns
- nimmt mit zunehmendem Abstand vom Kern monoton ab

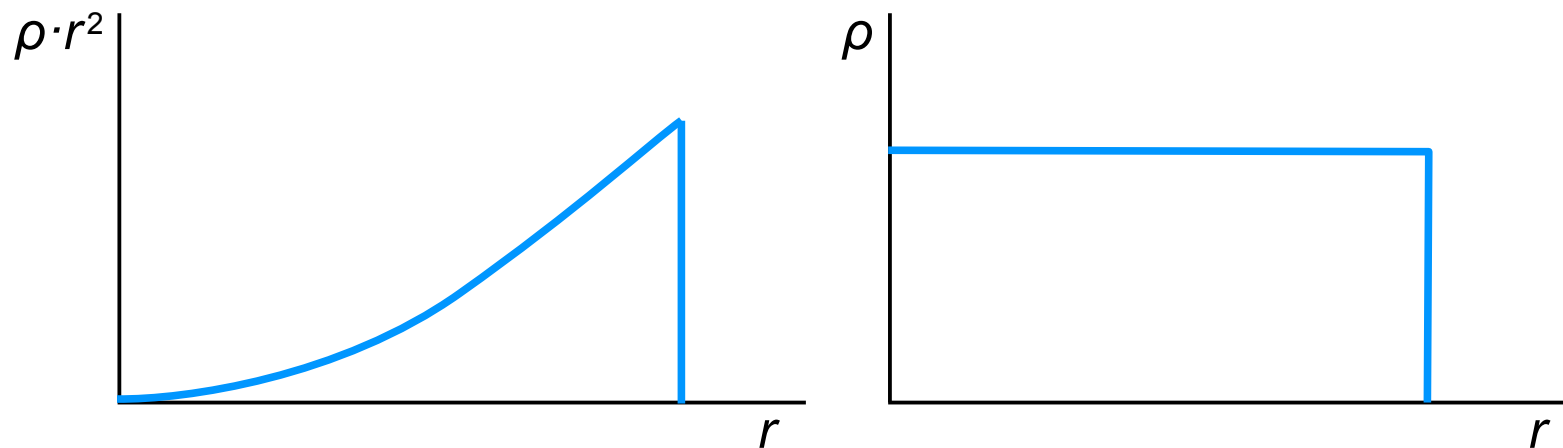
Funktion $r^2 \cdot \rho(r)$:

- am Ort des Kerns Null
- geht über mehrere Maxima wieder gegen Null



2. Das Schalenmodell

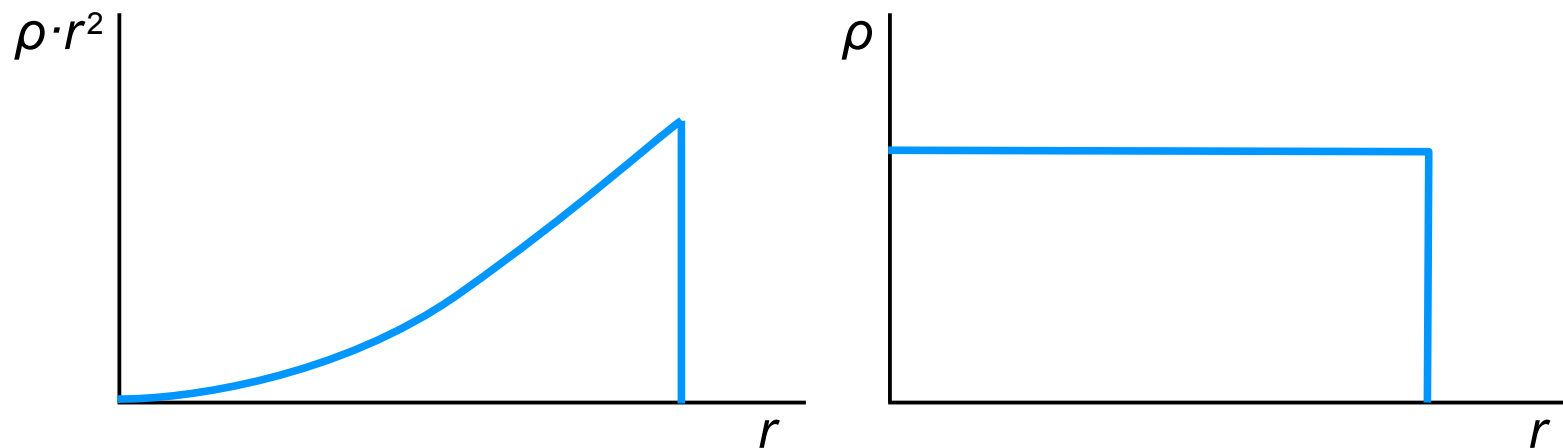
Wie ist der Gegenstand beschaffen?



2. Das Schalenmodell

„Es ist viel wahrscheinlicher, einen Lottogewinner in Baden-Württemberg anzutreffen als in Speyer.“

Statistik: „verzerrte Stichprobe“



2. Das Schalenmodell

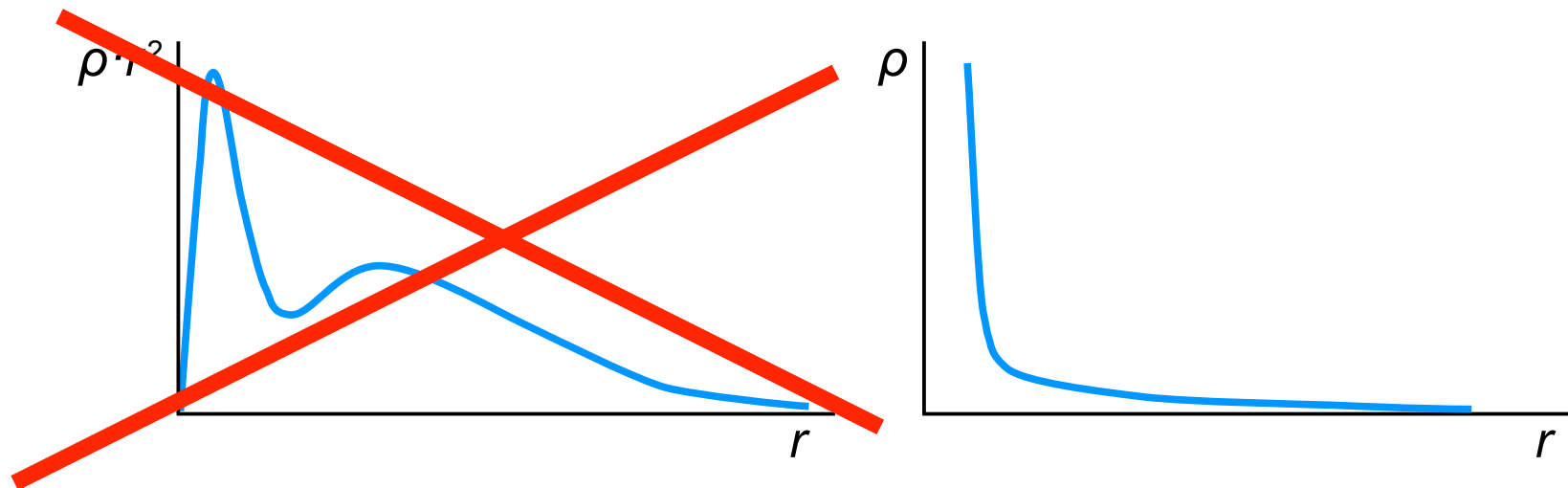
Man nahm das Schalenmodell zu ernst.

Da die Schalenstruktur in der Dichte nicht zu erkennen ist, half man etwas nach.

Es schien zu stören, dass die Elektronendichte am Ort des Kerns nicht null ist.

Darstellung von $r^2 \cdot \rho(r)$

- liefert keine wichtige Einsicht;
- erzeugt falsche Vorstellungen.



2. Das Schalenmodell

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen

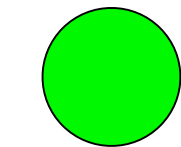
„Zwei Teilchen nennt man identisch, wenn das Ergebnis der Messung einer beliebigen Größe oder Observable des Systems invariant gegenüber einer Teilchenvertauschung ist. Man sagt dann auch, die Teilchen seien ununterscheidbar.“

„Zwei Teilchen heißen identisch, wenn alle inneren Eigenschaften (Masse, Spin, Ladung, usw.) exakt übereinstimmen: Es gibt kein Experiment, mit dem man die Teilchen voneinander unterscheiden könnte. Alle Elektronen des Universums sind also identisch, ebenso alle Protonen oder alle Wasserstoffatome.“

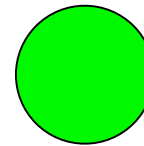
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen

Trivialität? oder Besonderheit der Quantenwelt?

1. Schwierigkeit: Teilchen und Zustände



Elektron
links



Elektron
rechts

Teilchen: unterscheidbar (links/rechts)

Zustände: **nicht** unterscheidbar

3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen

2. Schwierigkeit: Teilchen als Individuum

3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen

Klassische Mechanik:

- individuelle Körper
- wieder erkennbare, dauerhafte Eigenschaften in großer Zahl (Form, Zusammensetzung, Farbe,...)

Quantenmechanik:

- Zahl der charakteristischen Eigenschaften sehr gering (Masse, Impuls, Drehimpuls,...)
- nicht wieder erkennbar
- Begriff des Individuums entsteht asymptotisch, wenn das System immer mehr Freiheitsgrade bekommt:
Emergente Eigenschaft

3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen

- Die Quantenmechanik wird einfacher, wenn man nicht die Sprache und die Anschauungen aus der Punktmechanik übernimmt.
- Elektronen als unteilbare Portionen eines Stoffes

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik

**„Der Bahnbegriff verliert in der
Quantenmechanik seinen Sinn.“**

4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik

„Der Bahnbegriff verliert in der
Quantenmechanik seinen Sinn.“

Hat der Bahnbegriff Sinn...

- in der Thermodynamik?
- in der geometrischen Optik?
- in der Wellenoptik?
- im Alltag?

(Bahn einer Wolke, von Daten im Internet, einer
Überweisung,...)

Meist hat der Bahnbegriff keinen Sinn!

4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik

„Der Bahnbegriff verliert in der
Quantenmechanik seinen Sinn.“

- man verwendet ein unpassendes Modell
(punktförmige, individuell verfolgbare Körperchen)
- man muss die erzeugten Probleme mühsam korrigieren

Das Problem ist hausgemacht!

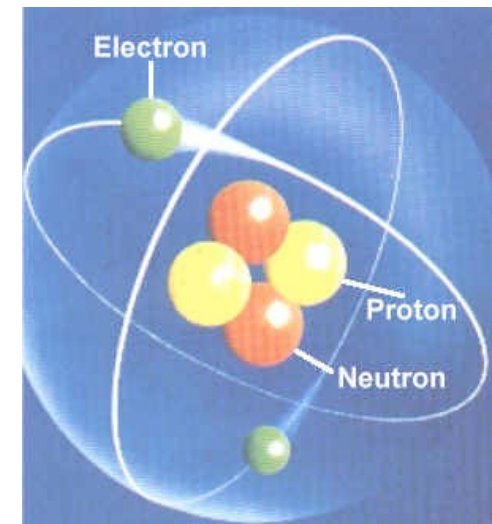
- Grundzustand des Wasserstoffatoms -
weder Theorie noch Experiment liefern Hinweise auf:
- Punktförmigkeit des Elektrons
 - Bewegung des Elektrons

4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik

- Das Teilchenmodell war außerordentlich erfolgreich.
- Funktionierende Konzepte werden weiterverfolgt
- Teilchenmodell in der Quantenphysik
⇒ Wahrscheinlichkeitsinterpretation

Nicht auszurotten:

- Bohrsches Atommodell
- „kreisende“ Elektronen



- Man halte sich an die Theorie.
- Man verwende keine Modelle, die selbst wieder Verständnisprobleme erzeugen.

4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

5. Orbitale

1. „Die zugehörigen $|\psi|^2$ bestimmen die möglichen Aufenthaltsbereiche von Elektronen, Orbitale genannt.“ (Dorn-Bader)
2. „Den Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons im Atom bezeichnet man als Orbital.“ (Sexl...)
3. „Stattdessen gilt die Bezeichnung Atomorbital ... für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons innerhalb eines Atoms.“ (dtv-Atlas zur Chemie).
4. „Die Wellenfunktion eines Elektrons wird auch Orbital genannt.“ (Bergmann - Schaefer)

5. Orbitale

1. „Die zugehörigen $|\psi|^2$ bestimmen die möglichen Aufenthaltsbereiche von Elektronen, Orbitale genannt.“ (Dorn-Bader)

Durch $|\psi|^2$ bestimmter Bereich

2. „Den Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons im Atom bezeichnet man als Orbital.“ (Sexl...)

Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit

3. „Stattdessen gilt die Bezeichnung Atomorbital ... für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons innerhalb eines Atoms.“ (dtv-Atlas zur Chemie).

Funktion $|\psi|^2$

4. „Die Wellenfunktion eines Elektrons wird auch Orbital genannt.“ (Bergmann - Schaefer)

Funktion ψ

5. Orbitale

„Orbital“: Ersatz für abhanden gekommene „Umlaufbahn“
→ Wellenfunktion, Quadrat der Wellenfunktion

„Feld“: physikalisches System
→ physikalische Größe E

„Bit“: Maßeinheit für Datenmenge
→ Zweizustandssystem

„Widerstand“: physikalische Größe U/I
→ elektronisches Bauteil

1. „Die zugehörigen $|\psi|^2$ bestimmen die möglichen Aufenthaltsbereiche von Elektronen, Orbitale genannt.“ (Dorn-Bader)
2. „Den Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons im Atom bezeichnet man als Orbital.“ (Sexl...)
3. „Stattdessen gilt die Bezeichnung Atomorbital... für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons innerhalb eines Atoms.“ (dtv-Atlas zur Chemie).
4. „Die Wellenfunktion eines Elektrons wird auch Orbital genannt.“ (Bergmann - Schaefer)

5. Orbitale

Gedachter Behälter mit einem Fassungsvermögen, das sich von Ort zu Ort ändert und durch $|\psi|^2$ bestimmt ist.

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge

„Die Frequenzen aller Linien eines Spektrums lassen sich als Differenzen von wenigen Spektraltermen darstellen, die miteinander kombiniert werden.

Allerdings treten nicht alle Kombinationen von Termen als Spektrallinien auf: Es gibt gewisse Übergangsverbote oder Auswahlregeln, deren wahre Bedeutung erst die Quantenphysik enthüllt."

6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge

„Die Frequenzen aller Linien eines Spektrums lassen sich als Differenzen von wenigen Spektraltermen darstellen, die miteinander kombiniert werden.

Allerdings treten nicht alle Kombinationen von Termen als Spektrallinien auf: Es gibt gewisse Übergangsverbote oder Auswahlregeln, deren wahre Bedeutung erst die Quantenphysik enthüllt.“

und was sagt die Quantenphysik?

Es kann passieren, dass das Matrixelement für einen elektrischen Dipolübergang null wird, weil die beteiligten Wellenfunktionen eine bestimmte Symmetrie haben.

noch Fragen?

6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge

Auswahlregel: $\Delta l = \pm 1$

Bei einem Übergang eines Atoms, an dem ein Photon beteiligt ist, muss sich der Drehimpuls um $1\hbar$ ändern.

Photonen haben einen Drehimpuls vom Betrag $1\hbar$.

Die Auswahlregel ist also Ausdruck der Drehimpulserhaltung.

Auswahlregel: $\Delta l = \pm 1$

Die Auswahlregel ist also Ausdruck der Drehimpulserhaltung.

Energieerhaltung + Drehimpulserhaltung



mögliche Übergänge: $\ddot{U}_1, \ddot{U}_3, \dots$



Berechnung von
quantenmechanischen
Matrixelementen

6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge

Auswahlregel: $\Delta l = \pm 1$

Die Auswahlregel ist also Ausdruck der Drehimpulserhaltung.

Energieerhaltung + Drehimpulserhaltung



mögliche Übergänge: $\ddot{U}_1, \ddot{U}_3, \dots$

Wo in der Physik erwartet man, dass ein Prozess schon deshalb ablaufen kann, weil er den Energieerhaltungssatz befolgt?

Die wichtigste Quelle für die Erkenntnisse der Atom- und Quantenphysik war Spektroskopie.

Auf Grund der Regeln der Spektroskopie hatte man erwartet, dass man alle Terme miteinander kombinieren kann.

Hätte man gleich gewusst, dass die Drehimpulserhaltung die Ursache ist, hätte man sicher nicht von einem Verbot gesprochen.

Ein Vorgang läuft ab, weil er die Naturgesetze befolgt, und nicht weil er irgendwelchen Verboten aus dem Weg geht.

Von Anfang an: Quantenzahl l
ist ein Maß für den Drehimpuls
des Atoms in Einheiten von \hbar .
Photon hat einen Drehimpuls von
 $1\hbar$.

Der Drehimpuls des Atoms muss sich bei
Absorption und Emission eines Photons um
 $1\hbar$ verändern.

Eine Auswahlregel wird überflüssig.

1. Das leere Atom
2. Das Schalenmodell
3. Nichtunterscheidbarkeit von Teilchen
4. Der Bahnbegriff in der Quantenmechanik
5. Orbitale
6. Auswahlregeln, verbotene Übergänge
7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

1. „Die ψ -Funktion selbst hat keine unmittelbare physikalische Bedeutung.“
2. „... stellt ψ keine unmittelbar messbare Größe wie eine Länge oder eine Feldstärke dar.“
3. „Dass die ... Wellenfunktion nicht reell, sondern komplex ist, spiegelt u.a. wider, dass $\psi(\mathbf{r},t)$ nicht die reale physikalische Bedeutung zukommt wie etwa der elektrischen Feldstärke $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ einer Lichtwelle in klassischer Optik bzw. Elektrodynamik (in der Quantenelektrodynamik kommt auch \mathbf{E} keine reale physikalische Bedeutung zu).“

Argumente:

ψ ist komplex

aber: andere Größen sind auch komplex, und man spricht keine Warnung aus

Die Phase von ψ sei nicht messbar.

aber: stimmt nicht, äußert sich in der Stromdichte

Was heißt: unmittelbar messbar?

Die Bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation

keine Anschauung möglich

7. Zur physikalischen Bedeutung der Psi-Funktion

Wenn man über Messbarkeit spricht, einfacheres
Beispiel wählen

Das Bedürfnis für den Hinweis verschwindet, wenn
man ein besseres Modell wählt: Schrödinger,
Madelung.

Ende



Kindle-Buch:

<https://www.amazon.de/dp/B086N1R1YC>