

Minitest 12

- Elektronen können sich zu sogenannten Cooper-Paaren vereinigen. Dabei haben die Elektronen antiparallelen Spin. Mit wie vielen dieser Cooper-Paaren kann ich deren niedrigsten energetischen Grundzustand besetzen?

Auger-Effekt

Der Auger-Effekt, benannt nach Pierre Auger, ist ein strahlungsloser Übergang eines Elektrons in der Elektronenhülle eines Atoms. Er ist ein Alternativprozess zur Röntgenemission bei Auffüllung eines Lochs in einer stärker gebundenen Elektronenschale. Diesen Effekt hatte bereits Lise Meitner 1922 in einer weniger beachteten Arbeit beschrieben. Da beide den Effekt unabhängig voneinander beschrieben haben, wird der Effekt in einigen neueren Publikationen auch als *Auger-Meitner-Effekt* bezeichnet.

Erhält ein relativ fest gebundenes Elektron aus einer der inneren Schalen durch ein Photon oder Elektron ausreichend Energie, wird es aus der Atomhülle herausgelöst (Ionisation). Der frei gewordene Platz wird aufgrund seiner niedrigen energetischen Lage durch ein Elektron aus einem höheren Energieniveau wieder belegt. Die dabei frei werdende Energie muss aber nicht in jedem Fall durch Emission eines Photons abgeführt werden (z. B. als charakteristische Röntgenstrahlung), sondern kann auch auf ein anderes Elektron übertragen werden, welches das Atom als **Auger-Elektron** verlässt.

Die Energie des ausgestrahlten Auger-Elektrons ist von den Energieniveaus des beteiligten Atoms abhängig. Sie ergibt sich aus dem Energieniveau des ursprünglichen unbesetzten Zustands, dem Ausgangsniveau des Elektrons, das den Zustand füllt, sowie dem Ausgangsniveau des Augerelektrons.

Die möglichen Übergänge sind deswegen nach den beteiligten Elektronen benannt. Wird beispielsweise ein Elektron in der K-Schale herausgelöst, der freiwerdende Platz durch ein Elektron der L-Schale gefüllt und ein Elektron der M-Schale ausgestrahlt (siehe Abbildung), wird dieses Elektron als KLM-Auger-Elektron bezeichnet.

Der Auger-Effekt wird auch als innerer Photoeffekt bezeichnet. Dabei kann man sich vorstellen, dass zwar ein Röntgenphoton emittiert, aber im selben Atom sofort wieder absorbiert wird, was dann zur Emission des Auger-Elektrons führt. Dies ist aber nur eine Modellvorstellung, da der Auger-Effekt ein strahlungsfreier Prozess ist, und somit die Auswahlregeln bei den Übergängen nicht berücksichtigt werden müssen.

Die Zahl der emittierten Auger-Elektronen hängt auch von der Ordnungszahl Z des untersuchten Elements ab. Am meisten werden Auger-Elektronen von sehr leichten Elementen emittiert, mit zunehmender Ordnungszahl wird dagegen hauptsächlich Röntgenstrahlung emittiert, so dass die chemische Analyse mit Auger-Elektronen-Spektroskopie auf leichtere Elemente beschränkt ist.

Auger-Elektronen-Spektroskopie

Die Auger-Elektronen-Spektroskopie ist aufgrund der geringen Reichweite von Elektronen im relevanten Energiebereich (ca. 50 eV bis 3 keV) eine sehr oberflächenspezifische Methode. Die erfasste Materialschicht umfasst typischerweise nur die obersten zehn Atomlagen. Das Verfahren kann daher sehr effizient zur örtlich hochauflösenden (0,01 μm bis 100 μm) Detektierung von Verunreinigungen benutzt werden. Soll dagegen wirklich das reine Material erfasst werden und nicht unabsichtlich aufgebraachte Verunreinigungen, die bei der Probenpräparation entstanden sind, so müssen diese zum Beispiel durch Sputtern mit Argon entfernt werden.

Mit einem Auger-Elektronen-Spektroskop können auch Bilder von der Art eines Rasterelektronenmikroskops (REM) erzeugt werden. Hierfür ist ein Sekundärelektronendetektor nötig, der die Sekundärelektronen in ein REM-Bild umwandelt. So lässt sich eine vergleichbare Auflösung wie bei einem „gewöhnlichen“ REM erzielen. Neben dieser Funktion kann man zur Bilderstellung auch noch den AES-Detektor nutzen. So lassen sich Bilder aufnehmen, die eine Materialinformation tragen. Dieses Verfahren nennt sich Raster-Auger-Elektronenmikroskopie (engl. *scanning Auger microscopy*, SAM). Die Nachweisgrenze mit diesem Verfahren liegt bei ca. 0,01–0,1 at%. Erst ab diesem Wert lässt sich der AES-Peak auswerten.

Auch bei der Photoelektronenspektroskopie treten Auger-Elektronen auf. Die durch den Auger-Effekt verursachten Peaks unterscheiden sich dadurch von den „Photopeaks“, dass ihre Energie nicht von der des eingestrahlten Ultraviolett- oder Röntgenlichts abhängt.

Spektroskopie

Spektroskopie bzw. **Spektrometrie** ist eine Gruppe von Beobachtungsverfahren, die anhand des Spektrums (Farbzerlegung) von Lichtquellen untersuchen, wie elektromagnetische Strahlung und Materie in Wechselwirkung stehen.

Spiritusflamme und ihr Spektrum

Licht als Teil des elektromagnetischen Spektrums

Sie sind wichtige Analysemethoden der Physik, Chemie und Astronomie und gehen auf eine 1859 von Kirchhoff und Bunsen gemachte Entdeckung zurück, dass verschiedene chemische Elemente die Flamme eines Gasbrenners auf charakteristische Weise färben. Zuvor hatte bereits Joseph von Fraunhofer 1814 im Spektrum der Sonne auftretende dunkle Linien untersucht, ohne allerdings ihren Ursprung erklären zu können. Spektroskopische Beobachtungen gaben entscheidende Impulse für die Entwicklung der Quantenmechanik.

Man unterscheidet drei Fälle der Wechselwirkung:

elastische Streuung: Man beobachtet nur eine Impulsänderung der Photonen. Beispiele sind die Röntgenbeugung, Neutronen- und Elektronenbeugung

inelastische Streuung: z. B. Raman-Spektroskopie

resonante Absorption bzw. Emission von Photonen.

Im allgemeineren Sinne wird die Bezeichnung Spektroskopie auch für die Messung der Energieverteilung von z. B. Gammastrahlung oder Teilchenstrahlungen wie Alpha-, Beta-Strahlung oder freien Neutronen gebraucht.

Spektroskopie im engeren Sinn bezieht sich meistens auf den letzteren Fall. Man untersucht, bei welchen Frequenzen oder Wellenlängen eine Substanz Energie in Form von Lichtquanten bzw. elektromagnetischen Wellen aufnehmen (absorbieren) oder abgeben (emittieren) kann.

Die Energie eines Lichtquants oder die dementsprechende Frequenz einer elektromagnetischen Welle entspricht dabei der Energiedifferenz zweier quantenmechanischer Zustände der zu untersuchenden Substanz:

Darin ist h die Planck-Konstante, ν die Frequenz des Lichtquants und ΔE die Energiedifferenz. Diese Gleichung wird auch als Grundgleichung der Spektroskopie bezeichnet. Die Energiedifferenzen quantenmechanischer Zustände hängen von der chemischen Zusammensetzung einer Probe oder der Struktur eines Moleküls ab und enthalten daher wichtige Informationen für den Chemiker, Physiker und Biologen.

Historisch bezeichnet der Begriff in erster Linie solche Verfahren, die die Absorption oder Emission von Licht untersuchen. Mit Hilfe eines Spektrometers wird dabei ein Lichtspektrum (Intensität des absorbierten, reflektierten oder ausgestrahlten Lichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge) gemessen. Die Spektren unterscheiden sich erheblich von Element zu Element, wie in den Bildern zu sehen ist.

Als *Spektrum* bezeichnet man allgemein eine Auftragung einer zur Energie proportionalen Größe (z. B. Frequenz, Wellenzahl) gegen eine Intensität. Der Begriff darf nicht mit Chromatogramm (Retentionsgröße gegen Intensität) in der Chromatographie oder Massenspektrum (Masse gegen Intensität) in der Massenspektrometrie verwechselt werden.

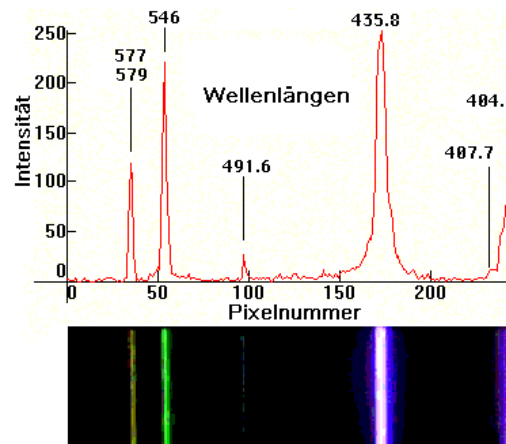
Neben dem Bereich des sichtbaren Lichts deckt die Spektroskopie heute einen großen Teil des elektromagnetischen Spektrums ab, von den Radiowellen bis zur Gammastrahlung.

Ziel der Spektroskopie ist es, aus dem gemessenen Spektrum Rückschlüsse auf die Probe bzw. den strahlenden Körper zu ziehen – etwa auf die innere Struktur oder die Temperatur (z. B. bei Sternen)

die stoffliche Zusammensetzung oder die Dynamik einer chemischen Reaktion

Die analytische Spektroskopie erkennt Atome oder Moleküle an der charakteristischen Form ihrer Spektren.

Die Präzisionsspektroskopie setzt sich zum Ziel, aus der genauen Lage oder der Stärke von Spektrallinien physikalische Größen, zum Beispiel Naturkonstanten zu bestimmen oder Hypothesen über Naturgesetze zu testen.



Spektroskopiearten und -methoden in der Analytik

Atom-spektroskopie

Atomabsorptionsspektroskopie (AAS/OAS)

Flammentechnik

Graphitrohrtechnik

Hydridtechnik

Atomemissionsspektroskopie (AES/OES)

Induktiv gekoppeltes Plasma (ICP-AES)

Mikrowellen-Plasmafackel-AES (MPT-AES)

Atomfluoreszenzspektroskopie (AFS)

Gammastreptroskopie

Mößbauer-Spektroskopie (beruhend auf dem Mößbauer-Effekt)

Elektronenspektroskopie

Photoelektronenspektroskopie mit Röntgenstrahlen (XPS)

Photoelektronenspektroskopie mit UV-Licht (UPS)

Photoelektronenspektroskopie winkelaufgelöst (ARPES)

Auger-Elektronen-Spektroskopie (AES)

Elektronen Energieverlust-Spektroskopie (EELS)

Röntgenspektroskopie (XRS)

Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Röntgenbeugungsspektroskopie

Röntgenabsorptionsspektroskopie

Glimmentladungsspektroskopie (GDOES)

Molekülspektroskopie

Frequenzmodulationsspektroskopie

Fluoreszenzspektroskopie

Einzelmolekülfluoreszenzspektroskopie

Schwingungsspektroskopie

Infrarotspektroskopie (IR)

Ramanspektroskopie

Kernresonanzspektroskopie (NMR, auch Hochfrequenzspektroskopie)

Elektronenspinresonanz (ESR/EPR)

Elektronendoppelresonanzspektroskopie (ENDOR)

Mikrowellenspektroskopie

UV/VIS-Spektroskopie (UV/Vis)

Dielektrische Spektroskopie

Festkörperspektroskopie

Reflexionsspektroskopie

Absorptions- bzw. Transmissionsspektroskopie

Fotoleitungsspektroskopie

Massenspektrometrie (MS) Die Massenspektrometrie (oft auch falsch Massenspektroskopie genannt) ist kein Spektroskopie-Verfahren im eigentlichen Sinne. Dennoch wird sie in diesem Zusammenhang häufig genannt, weil sie in der Analytik einen ähnlichen Zweck erfüllt.

Ultrakurzzeit-Spektroskopie

Laserspektroskopie

Cavity-ring-down-Spektroskopie

Laserinduzierte Fluoreszenz

Impedanzspektroskopie

Ionen-Spektroskopie

Ionen-Streuungs-Spektroskopie (ISS)

Sekundärionen-Massenspektrometrie (SIMS)