

# Elektromagnetische Strahlung

## Linienstrahlung

### Grundlagen aus dem ersten Semester

[05-Astronomische Instrumente \(Seite 2 - 3\)](#)

[07-Eigenschaften der Sterne \(Seite 2 - 5\)](#)

[Einführung in die Physik \(Seite 70 - 103\)](#)

Die Linienstrahlung ist für die Astronomie besonders wichtig, weil dadurch die Emissions- und Absorptionslinien in einem Spektrum zustandekommen. Diese sind unerlässlich, um festzustellen, aus welchen Materialien die Objekte im Weltall bestehen.

## 1 Bewegung des Elektrons

Laut Quantenmechanik kann sich ein Elektron auf unterschiedlichen diskreten Kreisbahnen um den Atomkern aufhalten, wobei es sowohl innerhalb dieser Bahnen hin- und herspringen als auch auf eine andere Bahn springen kann. Diese Kreisbahnen nennt man Schalen oder Zustände. In welchem Radius sich diese Schalen genau befinden, hängt vom Material ab.

Wenn sich ein Elektron auf der innersten Schale befindet, sagt man, das Elektron befindet sich im Grundzustand. Bei allen anderen Elektronen sagt man, dass sie im angeregten Zustand sind.

Das Magnetfeld um den Atomkern (es wird von der elektromagnetischen Kraft des Elektrons ausgelöst) besitzt so wie das Gravitationsfeld einen Potentialtopf. Das heißt das Elektron gewinnt Energie, wenn es in eine weiter innen liegende Schale springt und benötigt Energie, um in eine weiter außen liegende Schale zu springen.

Wenn das Elektron nach innen springt, gibt es die gewonnene Energie in Form von Linienstrahlung ab. Die Frequenz dieser Strahlung, kann man mit der Formel  $E = h\nu$  ausrechnen. Da die Elektronen immer nur zwischen vorhandenen Schalen hin- und herspringen, können sie nur bestimmte Mengen an Energie erhalten und daher nur bestimmte Frequenzen abstrahlen. Bei diesen Frequenzen tauchen in einem Emissionsspektrum Emissionslinien auf.

Wenn das Elektron nach außen springt, benötigt es Energie. Diese Energie bekommt es, indem es ein Photon emittiert, das genau die richtige Energie hat, um in eine andere Kreisbahn zu springen. Die Photonen, die zu viel oder zu wenig Energie haben, um ein Elektron in eine andere Kreisbahn zu befördern, durchqueren das

Material ohne absorbiert zu werden. Im Absorptionsspektrum sieht man dunkle Absorptionslinien bei den Frequenzen, die die richtige Energie haben, um die Photonen in eine andere Schale zu befördern.

Wenn ein Photon eine gewisse Frequenz übersteigt, gibt es den Elektronen so viel Energie, dass sie das Atom ganz verlassen können. Dafür werden keine diskreten Energien mehr benötigt, weil es dort keine diskreten Kreisbahnen mehr gibt. In diesem Bereich absorbiert das Elektron alle Photonen und das Material ist in diesem Frequenzbereich optisch dick.

Die Atome, die ihre Elektronen verloren haben, heißen Ionen und sind positiv geladen. Sie ziehen so lange Elektronen an, bis sie wieder gleich viele Protonen wie Elektronen haben und ungeladen sind.

Elektronen, die sich in einer der Schalen befinden, bezeichnet man als gebundene Elektronen. Elektronen die sich außerhalb eines Atoms befinden, bezeichnet man als freie Elektronen.

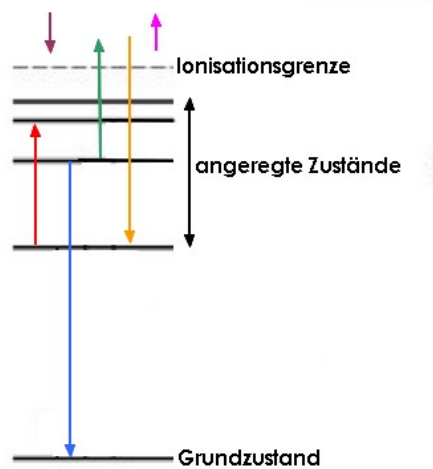
Wenn ein Elektron aus dem Atom springt, bezeichnet man das als gebunden-freien-Übergang oder Ionisation. Wenn ein Elektron von einem Ion aufgefangen wird, bezeichnet man das als frei-gebundenen Übergang oder Rekombination. Wenn das Elektron zwischen zwei Schalen hin- und herspringt bezeichnet man das als gebunden-gebundenen Übergang oder Linienstrahlung. Wenn ein Elektron vom Atom angezogen wird, ohne in das Atom zu fallen, bezeichnet man das als frei-freien-Übergang oder Bremsstrahlung

## 2 Darstellung der Übergänge

Die Übergänge kann man sowohl grafisch als auch formal eindeutig darstellen.

### **Grafische Darstellung: Grottriendiagramme**

Grottriendiagramme dienen dazu, die Sprünge von Elektronen übersichtlich darzustellen. Dafür wird der Radius entlang der y-Achse aufgetragen. (Die x-Achse hat hier keine Bedeutung).



Die schwarzen Striche stellen die unterschiedlichen Schalen dar. Die innerste Schale (mit dem kleinsten Radius) ist am weitesten unten dargestellt. Die gestrichelte Linie ist die sogenannte Ionisationsgrenze: Wenn das Elektron die Ionisationsgrenze überschreitet, ist es nicht mehr an den Atomkern gebunden. Diese Linie ist ganz oben, weil sie sich außerhalb der Schalen befindet.

Die Bahnen der Elektronen sind mit Pfeilen dargestellt. In unserem Beispiel stellt der rote Pfeil ein Elektron dar, das vom innersten angeregten Zustand zwei Schalen nach außen springt. Der blaue Pfeil zeigt in die andere Richtung: Dieses Elektron springt zwei Schalen nach innen in den Grundzustand zurück. Der grüne Pfeil überschreitet die Ionisationsgrenze. Hierbei handelt es sich um eine Ionisation. Der orangefarbene Pfeil überschreitet die Ionisationsgrenze in die andere Richtung. Das ist eine Rekombination. Der rosane und der violette Pfeil sind vollständig außerhalb der Ionisationsgrenze, es handelt sich also um Bremsstrahlung. Dabei wird der rosane Pfeil vom Atom abgestoßen und der violette vom Atom angezogen.

## Formale Darstellung

Die Schalen werden von innen nach außen durchnummeriert, wobei 1 der Grundzustand, 2 der innerste angeregte Zustand usw. ist. Allgemein bezeichnet man die Schale, von der das Elektron wegspringt als  $n$  und die Schale, in die das Elektron hineinspringt als  $m$ . Einen Übergang gibt man in der Form  $n \rightarrow m$  an. Beispielsweise kann man den roten Pfeil in der Grafik als  $2 \rightarrow 4$  darstellen.

Wenn ein Atom noch nicht ionisiert wurde bezeichnet man es als neutrales Atom und stellt einen römischen Einser hinter das Elementsymbol. Wenn ein Elektron aus dem Atom geworfen wurde, bezeichnet man es als einfach ionisiert und stellt einen römischen zweier hinter das Element. Die Zahl hinter dem Element ist also immer um eins höher als der Ionisationsgrad, beispielsweise ist  $\text{Al III}$  zweifach ionisiertes Aluminium.

### 3 Linienstrahlung beim Wasserstoffatom

Das Wasserstoffatom ist das einfachste Beispiel, anhand dessen man die Linienstrahlung erklären kann, weil es nur ein einziges Elektron beinhaltet. Bei allen anderen Atomen wäre es schwieriger, weil man dann auch die Wechselwirkungen der Elektronen untereinander betrachten müsste.

Die Schalen werden definiert, indem man angibt, wie viel Energie das Elektron benötigen würde, um die Schale zu verlassen. Beispielsweise ist der Grundzustand des Wasserstoffatoms bei  $-13,6\text{eV}$ , das bedeutet ein Photon müsste mindestens  $13,6\text{eV}$  aufbringen, damit das Elektron das Wasserstoffatom verlässt.

Die Position aller Schalen des Wasserstoffatoms lässt sich mit der Folge

$$E_n = -\frac{13,6\text{eV}}{n^2} \quad (3.1)$$

angeben, wobei man für  $n$  alle natürlichen Zahlen einsetzen kann. Wenn man für  $n$  eins einsetzt, erhält man den Grundzustand. Setzt man für  $n$  zwei ein, erhält man den innersten angeregten Zustand usw. Dieses  $n$  bezeichnet man als Hauptquantenzahl.

Man erkennt, dass die Abstände zwischen den Schalen nach außen hin immer geringer werden. Bei  $13,6\text{eV}$  sind die Schalen unendlich nah beisammen, das heißt, dass das Elektron an jeden beliebigen Ort springen kann. In diesem Fall hat das Elektron das Atom verlassen.

Wenn sich ein Elektron im Grundzustand ( $-13,6\text{eV}$ ) befindet, benötigt es um in den innersten angeregten Zustand ( $-3,4\text{eV}$ ) zu springen  $13,6\text{eV} - 3,4\text{eV} = 10,2\text{eV}$ . Das bedeutet, wenn ein Photon mit einer Energie von  $10,2\text{eV}$  vorbeifliegt, absorbiert das Elektron das Photon.

Wenn ausreichend Wasserstoff zwischen Strahlungsquelle und Beobachter ist, werden alle Photonen mit einer Energie von  $10,2\text{eV}$  absorbiert, weil mehr Elektronen im Grundzustand als Photonen mit  $10,2\text{eV}$  vorhanden sind. Beim Beobachter kommen keine Photonen mit  $10,2\text{eV}$  mehr an und am Absorptionsspektrum befindet sich ein schwarzer Strich.

Wenn ein Elektron vom innersten angeregten Zustand in den Grundzustand zurückfällt, strahlt es  $10,2\text{eV}$  ab. Beim Beobachter kommen in einem ausreichend kleinen Frequenzintervall nur Elektronen mit  $10,2\text{eV}$  an und am Emissionsspektrum befindet sich an dieser Stelle eine farbige Linie.

Wenn ein Photon mehr als  $13,6\text{eV}$  Energie hat, schleudert es die Elektronen vom Grundzustand aus dem Atom und die Wasserstoffmoleküle werden zu positiv geladenen Wasserstoffionen. Später fangen diese wieder genau ein Elektron ein, weil sie genau ein Proton haben. Wenn ausreichend viel Wasserstoff zwischen Strahlungsquelle und Beobachter ist, werden alle Photonen mit mehr als  $13,6\text{eV}$  absorbiert und der Beobachter kann die Strahlungsquelle in diesem Frequenzintervall nicht beobachten.

Da sich im Weltall viel Wasserstoff befindet, erreichen uns Photonen mit mehr als 13,6eV nur aus unserem Sonnensystem. Bei 13,6eV ist eine sogenannte Ionisationskante, das bedeutet, dass uns ab dieser Energie viel weniger Elektronen erreichen.

Um die Elektronen im innersten angeregten Zustand aus der Schale zu schleudern, benötigt das Photon nur 3,2eV. Da es aber viel weniger Elektronen im angeregten Zustand als im Grundzustand gibt, müssen sich viel mehr Wasserstoffatome zwischen Strahlungsquelle und Beobachter befinden um auch in diesem Bereich optisch dick zu sein.

## Gründe für Übergänge

Der wichtigste Grund für den Sprung eines Elektrons in eine andere Schale ist die Absorption oder Emission von Photonen, weil das direkt mit der Durchlässigkeit von Strahlung und der Entstehung von Emissions- und Absorptionslinien zu tun hat.

**Absorption:** Ein Elektron absorbiert ein vorbeifliegendes Photon und kommt so in eine weiter außen liegende Schale.

**Photoionisation:** Ein Elektron absorbiert ein vorbeifliegendes Photon und verlässt das Atom

**Photo-/Strahlungsrekombination:** Ein freies Elektron wird von einem Ion eingefangen.

**Spontane Emission:** Ein Elektron in einem angeregten Zustand gibt ein Photon ab und fällt in einen tieferen Zustand. Der Zeitpunkt, zu dem das Elektron das macht und die Richtung, in die das Photon fliegt, sind zufällig.

**Stimulierte Emission:** Ein Photon wechselwirkt mit einem angeregten Elektron. Dadurch erzeugt das Elektron ein Photon mit der gleichen Richtung und der gleichen Energie, wie das wechselwirkende Photon. Das wechselwirkende Photon muss dafür die passende Energie haben, um das angeregte Elektron in eine weiter unten liegende Schale zu befördern.

Weitere Ursachen für Übergänge neben Photonen können Stöße, Temperaturunterschiede, Dichteunterschiede oder Druckunterschiede sein. Das ist deshalb wichtig, weil man dadurch aus der Spektralanalyse neben dem Material auch die Materialeigenschaften Temperatur, Dichte und Druck herauslesen kann. Diese Übergänge werden ebenfalls nach Absorption, Emission, Ionisation und Rekombination unterteilt. Hier werden die Übergänge am Beispiel der Stöße aufgezählt

**Stoßanregung:** Ein Teilchen (z.B. ein freies Elektron) stößt mit einem Elektron zusammen und stößt das Elektron dabei in eine höhere Schale

**Stoßabregung:** Ein Teilchen stößt das Elektron in eine tiefere Schale.

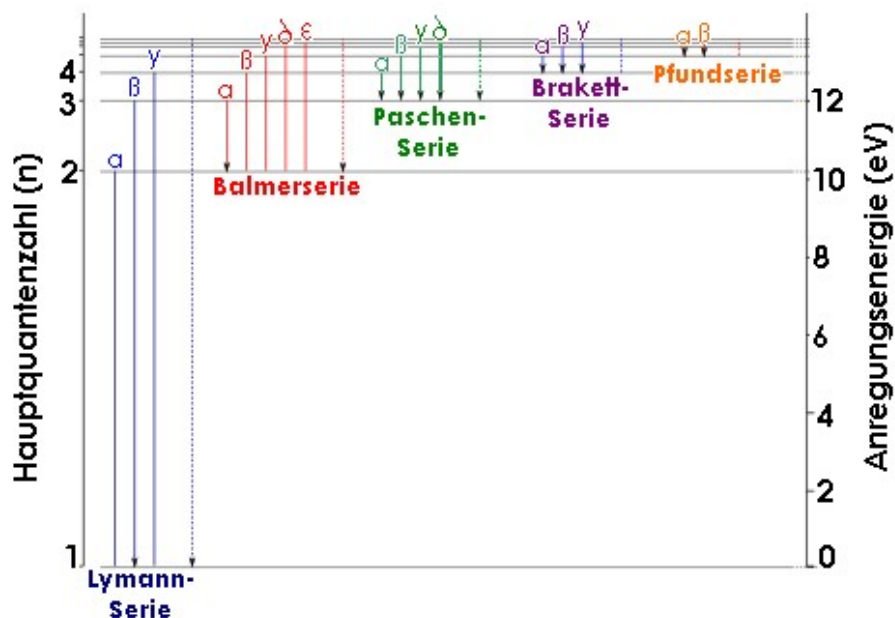
**Stoßionisation:** Ein Teilchen stößt das Elektron aus dem Atom heraus.

**Stoß-/3-Körper-Rekombination:** Ein Teilchen stößt das Elektron in ein Atom hinein.

## Emmissionslinien

Man bezeichnet die Linien mit  $m=1$  als Lyman-Serie (Ly) und die Linien mit  $m=2$  als Balmer-Serie (H). Danach folgen Paschen-Serie, Brackett-Serie und Pfund-Serie. Innerhalb der Serien vergibt man Buchstaben, wobei die Übergänge mit  $n-m=1$  mit einem  $\alpha$ , die Übergänge mit  $n-m=2$  mit einem  $\beta$  usw. bezeichnet werden.

Beispielsweise gilt für die  $H\alpha$ -Linie  $m=2$  (wegen dem H) und  $n-m=1$  (wegen dem  $\alpha$ ). Es handelt sich also um einen Übergang  $3 \rightarrow 2$



In dieser Grafik sind die wichtigsten Emissionslinien von Wasserstoff in einem Grottriendiagramm dargestellt.

## Linienstrahlung bei anderen Atomen

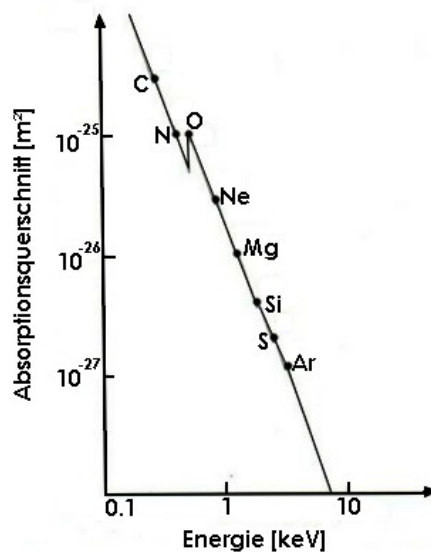
Da die Vorgänge bei Atomen mit mehreren Elektronen ungleich komplizierter sind, werden in diesem Skriptum nur ein paar ausgewählte Eigenschaften auf Atome mit mehreren Elektronen verallgemeinert

Im allgemeinen hängt die Ionisationsenergie eines Elektrons im Grundzustand, also die Energie, die nötig ist, um ein Elektron im Grundzustand aus dem Atom zu schleudern, nur von der Kernladungszahl ab:

$$E[\text{eV}] = 13,6 Z_{\text{eff}}^2 \quad (3.2)$$

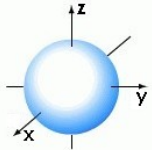
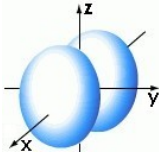
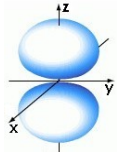
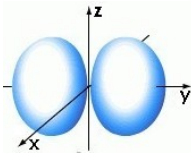
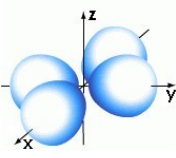
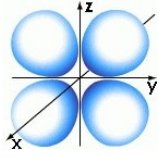
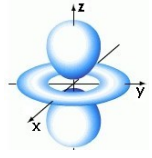
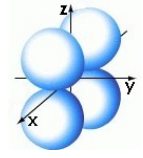
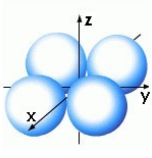
In dieser Formel steht  $Z_{\text{eff}}$  für die Kernladungszahl. Besonders oft benötigt man in der Astrophysik neben Wasserstoff ( $Z_{\text{eff}} = 1$ ) auch Sauerstoff ( $Z_{\text{eff}} = 8$ ), Sillizium ( $Z_{\text{eff}} = 14$ ) und Eisen ( $Z_{\text{eff}} = 26$ )

Es lässt sich ein ungefähr linearer Zusammenhang zwischen dem Absorptionsquerschnitt des Atoms, also der Fläche in der das Atom ein Photon reflektieren kann und der Ionisationsenergie eines Elektrons im Grundzustand feststellen.



## Quantenzahlen

Bei Elementen mit mehreren Atomen kann sich nicht nur die Schale (Hauptquantenzahl) sondern auch andere Eigenschaften ändern. Diese gibt man mit weiteren Quantenzahlen an. Mit diesen vier Eigenschaften kann man ein Elektron vollständig beschreiben:

	-2	-1	0	1	2
0					
1					
2					

**Nebenquantenzahl l:** Die Nebenquantenzahl gibt die Anzahl der Schlitzes des Elektrons an (Sie ist in den Zeilen der Tabelle dargestellt). Ist die Nebenquantenzahl 0, ist das Elektron eine Kugel. Wenn die Nebenquantenzahl 1 ist, hat das Elektron einen Schlitz, wobei dieser Schlitz parallel zum Magnetfeld, vertikal gedreht oder horizontal gedreht sein kann. Naheliegenderweise legt man die Koordinaten so, dass diese Schlitz genau auf der x-Achse, der y-Achse oder der z-Achse liegen. Wenn die Nebenquantenzahl 2 ist hat das Elektron 2 Schlitzes, wobei jede in alle 3 Koordinatenrichtungen verlaufen kann. Die höchstmögliche Nebenquantenzahl ist eins weniger als die Hauptquantenzahl, das heißt beispielsweise ein Elektron in der dritten Schale kann maximal 2 Schlitzes haben.

**Magnetquantenzahl m:** Die Magnetquantenzahl m gibt die Richtung der Elektronen an. Sie ist in den Zeilen der Tabelle dargestellt. Wenn die Magnetquantenzahl 0 ist, sind alle Schlitzes in Richtung des Magnetfeldes positioniert. Ist der Betrag der Magnetquantenzahl eins, steht ein Schlitz normal auf das Magnetfeld, wenn der Betrag zwei ist, zwei Schlitzes usw. Der Betrag der Magnetquantenzahl kann höchstens die Nebenquantenzahl sein, weil nicht mehr Schlitzes normal auf das Magnetfeld stehen können, als es Schlitzes gibt. Ist das Vorzeichen positiv, sind die meisten Schlitzes horizontal gedreht, ist das Vorzeichen negativ, sind die meisten Schlitzes vertikal gedreht.

**Spinquantenzahl s:** Die Spinquantenzahl gibt die Rotation der Elektronen um ihre eigene Achse an. Da sich das Elektron am Magnetfeld orientiert, gibt es nur zwei mögliche Richtungen:  $\frac{1}{2}$  im mathematisch positiven und  $-\frac{1}{2}$  im mathematisch nega-



tiven Sinn parallel zum Magnetfeld. Der Betrag ist stets  $\frac{1}{2}$  um ihn von den Photonen zu unterscheiden, die sich doppelt so schnell drehen.

## Übergangswahrscheinlichkeiten

Um die Wahrscheinlichkeit des Übergangs von Elektronen in eine andere Schale zu betrachten, benötigt man folgende Kombinationen aus den Quantenzahlen:

**Gesamtdrehimpulsquantenzahl j:** Die Gesamtdrehimpulsquantenzahl ist die Summe aus der Nebenquantenzahl und der Spinquantenzahl.

**Summe über alle Elektronen:** Die Summe einer Quantenzahl über alle Elektronen gibt man mit den zugehörigen Großbuchstaben an, so ist beispielsweise L die Summe aller Nebenquantenzahlen, S die Summe aller Spinquantenzahlen und J die Summe aller Gesamtdrehimpulsquantenzahlen.

Die wahrscheinlichsten Übergänge heißen Dipolübergänge. Für diese Übergänge gilt:

- S ändert sich nicht
- L ändert sich höchstens um 1
- J ändert sich höchstens um 1 bleibt aber nicht bei 0

Alle anderen Übergänge heißen verbotene Übergänge. Diese werden noch einmal weiter unterteilt. Eine wichtige Klasse von verbotenen Übergängen sind Quadrupolübergänge. Für sie gilt

- S ändert sich nicht
- L ändert sich genau um 2
- J ändert sich höchstens um 1 bleibt aber nicht bei 0

## 4 Nuklearlinien

In radioaktiven Elementen können nicht nur Elektronen sondern auch Protonen und Neutronen vom Atomkern herausgeschleudert werden. Dabei entsteht ein stabileres Element und es wird Energie gewonnen. Diesen Vorgang bezeichnet man als radioaktiven Zerfall, wenn er natürlich passiert und Kernspaltung wenn er künstlich vorkommt. Bei leichten Elementen wird Energie gewonnen, wenn der Atomkern neue Protonen und Neutronen erhält. Hier spricht man von Kernfusion. In beiden Fällen wird die gewonnene Energie in Form von Strahlung abgegeben. Am Spektrum entstehen dann zusätzlich zu den Emissions- und Absorptionslinien an diesen Stellen Nuklearlinien.