



# Das Atom

**Dr. R. Mini**

## Atombau

### Atommodelle

Atommodelle sind anschauliche Modelle zum Auf-bau der Atome. Sie dienen der korrekten Beschreibung des Verhaltens und der Eigenschaften von Atomen in bestimmten Situationen (Experimenten) und erheben keinen Anspruch auf absolute physikalische „Richtigkeit“.



## Atombau

### Ursprüngliche Atommodelle

Demokrit von Abdera 460 – 370 v.Chr.

„Jede Materie ist aus unteilbaren Teilchen (Atome) aufgebaut, welche in einer unendlichen Vielfalt von Formen auftreten können.“

Aristoteles 384 – 322 v. Chr.

„Jede Materie entsteht aus den vier Elementen *Feuer, Erde, Wasser und Luft*“



## Atombau

Dalton, Avogadro, Prout, Mendelejew 19. Jh.

„Entdeckung wichtiger chemischer Gesetzmässigkeiten, welche wegweisend für die modernen Vorstellungen der Atomphysik sind.“

Thomson , Becquerel Ende 19 Jh.

„Entdeckung des Elektrons und der Radioaktivität, was zu einer rasanten Entwicklung der modernen Atomphysik um die Jahrhundertwende führte“



## Atombau

### Historische Atommodelle

J.J.Thomson 1856 - 1940

„Erstes modernes atomphysikalisches Modell, wonach die Atome aus ca.  $10^{-10}$  m grossen Kugeln bestehen, in der die positive Ladung gleichförmig verteilt ist. In dieser seien die punktförmigen Elektronen gleichmässig, frei und reibungsfrei beweglich eingebettet.“

E. Rutherford 1871 - 1937

„Folgerung aus der Streuung von  $\alpha$ -Teilchen an einer Goldfolie:  
(Rutherfordsches Planetenmodell, 1911)

Atome besitzen einen Atomkern, in dem sich deren Masse und deren positive Ladung befindet und welcher von den Elektronen umkreist wird.“



## Atombau

### Schwächen des Rutherfordschen Planetenmodell

- Stabilität der Materie (klassische Elektrizitätslehre)
- Diskrete Elektronenbahnen (Atomspektroskopie)

### N. Bohr 1885 - 1962

N. Bohr versah 1913 das Rutherfordsche Modell mit physikalisch vorerst unerklärbaren Forderungen (Bohrsche Postulate), nach welchen sich die Elektronen nur auf diskreten stationären Kreisbahnen (Elektronenschalen) ohne Energieverlust aufhalten können. Es sind dabei nur solche Elektronenbahnen zugelassen, deren Drehimpuls ein Vielfaches der elementaren Drehimpulseinheit beträgt.



## Atombau

### **A. Sommerfeld 1868 - 1951**

Erweiterung des Bohrschen Atommodelles für elliptische Elektronenbahnen.

Nachdem das Bohrsche Atommodell nur die Energiezustände und das Spektrum des Wasserstoffatoms korrekt wiedergeben konnte, erlaubte erst das von Sommerfeld verfeinerte Modell die exakte Berechnung der Atomspektren komplexer Atome.



## Atombau

### Quantentheoretischen Atommodell

Darstellung der Aufenthaltswahrscheinlichkeitsverteilung der Elektronen in Form räumlicher Elektronenwolken (Orbitale) um den Atomkern herum.

Es zeigt sich, dass die quantenphysikalisch berechneten Elektronenverteilungswolken näherungsweise Kugeloberflächen um den Atomkern darstellen, die sich mit den Bohr-schen Elektronenschalen vergleichen lassen. Dies erklärt im Nachhinein den Erfolg des physikalisch unbegründeten Kreisschalenmodelles.





## Atombau

### Aufbau der Atomhülle

In der Atomhülle befinden sich die Elektronen in stationären diskreten Zuständen, die sich vor allem in der Energie unterscheiden. In Anlehnung an das Bohrsche Atommodell werden die unterschiedlichen Energiezustände Schalen genannt.

Diese Schalen lassen sich quantenphysikalisch durch folgende Quantenzahlen beschreiben:

- Hauptquantenzahl  $n$  ( $n=1,2,3,\dots$ )
- Bahndrehimpulsquantenzahl  $l$  ( $l \leq n-1$ )
- Magnetquantenzahl  $m_l$  ( $m_l = -l, -l+1, \dots, l-1, l$ )
- Eigendrehimpuls  $s$  [Spin] ( $s = \pm 1/2$ )



## Atomhülle

### Aufbau der Atomhülle

Aus den Quantenzahlen lässt sich die maximale Elektronen-Besetzungszahl  $n_{\max}$  für jede Schale von der Hauptquantenzahl  $n$  ableiten:

$$n_{\max} = 2 \cdot n^2$$

Hauptquantenzahl $n$	Schalenbezeichnung	Max. Elektronenzahl
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32
5	O	50

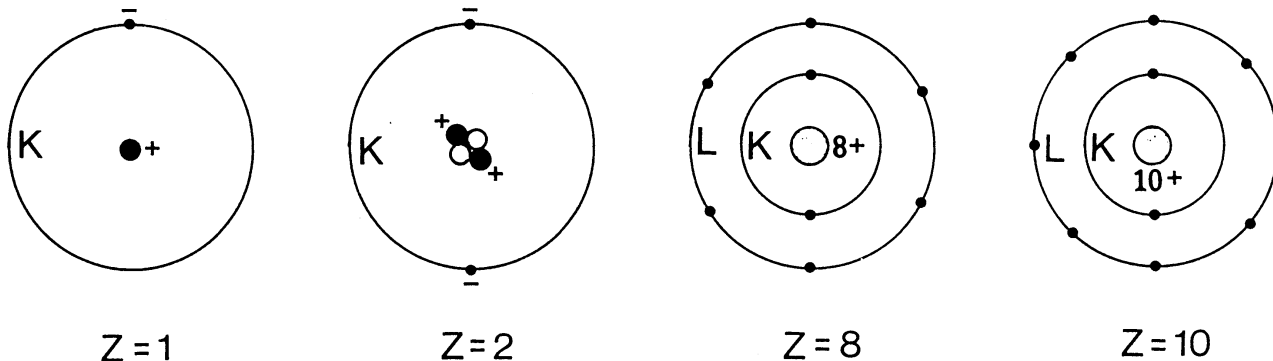
Bezeichnungen der Elektronenschalen nach dem Bohrschen Atommodell und maximale Besetzungszahlen nach dem Paulischen Ausschließungsprinzip



## Atomhülle

### Aufbau der Atomhülle

Obwohl das quantenphysikalische Modell überlegen ist, wird oft der Anschaulichkeit zu liebe auf die einfache „klassische“ Vorstellung des Bohrschen Atommodelles zurückgegriffen



Vereinfachter Aufbau der Atomhüllen nach dem Bohrschen Atommodell für verschiedene Elemente ( $Z = 1$ : Wasserstoff,  $Z = 2$ : Helium,  $Z = 8$ : Sauerstoff,  $Z = 10$ : Neon, Elemente mit einer maximal gefüllten äußeren Elektronenschale werden Edelgase genannt). Darstellung nicht maßstabsgerecht.

## Atomhülle

### Struktur der Atomhülle

#### Schalenradien

$$r_n = n^2 \cdot r_1 \quad \text{mit} \quad r_1 = 0.529 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

#### Bindungsenergie

$$E_{\text{bind}} = \frac{R^* \cdot Z^2}{n^2}$$

Element	Z	Elektronenschale							
		K	L			M	N	O	P
			(I)	(II)	(III)	(I-V)	(I-VII)	(I-IX)	(I-XI)
H	1	0.0136							
He	2	0.0246							
C	6	0.249	0.013	0.005	0.005				
O	8	0.543	0.024	0.009	0.009				
Al	13	1.558	0.118	0.073	0.073	0.005			
P	15	2.149	0.189	0.136	0.135	0.010-0.002			
K	19	3.608	0.379	0.297	0.295	0.035-0.018			
Ca	20	4.039	0.438	0.350	0.347	0.044-0.025			
Co	27	7.711	0.927	0.796	0.781	0.101-0.004			
Cu	29	8.981	1.099	0.953	0.933	0.123-0.003			
Ga	31	10.367	1.298	1.143	1.117	0.158-0.018	0.002		
Sr	38	16.105	2.216	2.007	1.940	0.358-0.133	0.038-0.020		
Y	39	17.039	2.373	2.155	2.080	0.395-0.158	0.046-0.026		
Tc	43	21.044	3.042	2.793	2.677	0.544-0.253	0.068-0.039		
In	49	27.940	4.238	3.938	3.730	0.826-0.444	0.122-0.077		
J	53	33.170	5.188	4.852	4.557	1.072-0.620	0.186-0.050		
Cs	55	35.985	5.713	5.360	5.012	1.217-0.724	0.231-0.075	0.023-0.011	
W	74	69.523	12.099	11.542	10.205	2.817-1.807	0.592-0.032	0.074-0.034	
Ir	77	76.111	13.419	12.824	11.215	3.174-2.041	0.690-0.061	0.096-0.051	
Au	79	80.722	14.353	13.733	11.918	3.425-2.206	0.759-0.084	0.108-0.054	
Tl	81	85.529	15.347	14.698	12.657	3.704-2.390	0.846-0.119	0.137-0.012	
Pb	82	88.005	15.861	15.200	13.035	3.851-2.484	0.894-0.136	0.148-0.018	
U	92	115.61	21.758	20.948	17.168	5.548-3.552	1.442-0.381	0.324-0.096	0.071-0.033

Experimentell bestimmte Elektronen-Bindungsenergien (in keV) für besetzte Schalen einiger im Strahlenschutz und der Radiologie wichtiger Elemente im Grundzustand der Atomhüllen. Die römischen Ziffern kennzeichnen die jeweiligen Unterschalen

**$R^*=13.6 \text{ eV}$  (Rydbergkonstante)**



## Atomzustände

(Zustände der Atomhülle)

### Grundzustand

- Zustand minimalster pot. Energie ja
- Atom nach Aussen elektrisch neutral ja

### Angeregter Zustand

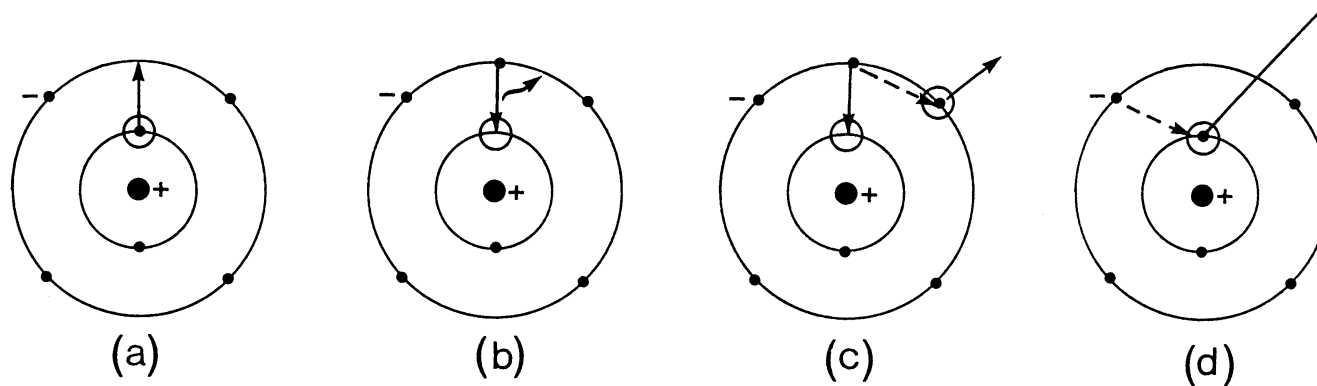
- Zustand minimalster pot. Energie nein
- Atom nach Aussen elektrisch neutral ja

### Ionisierter Zustand

- Zustand minimalster pot. Energie nein
- Atom nach Aussen elektrisch neutral nein



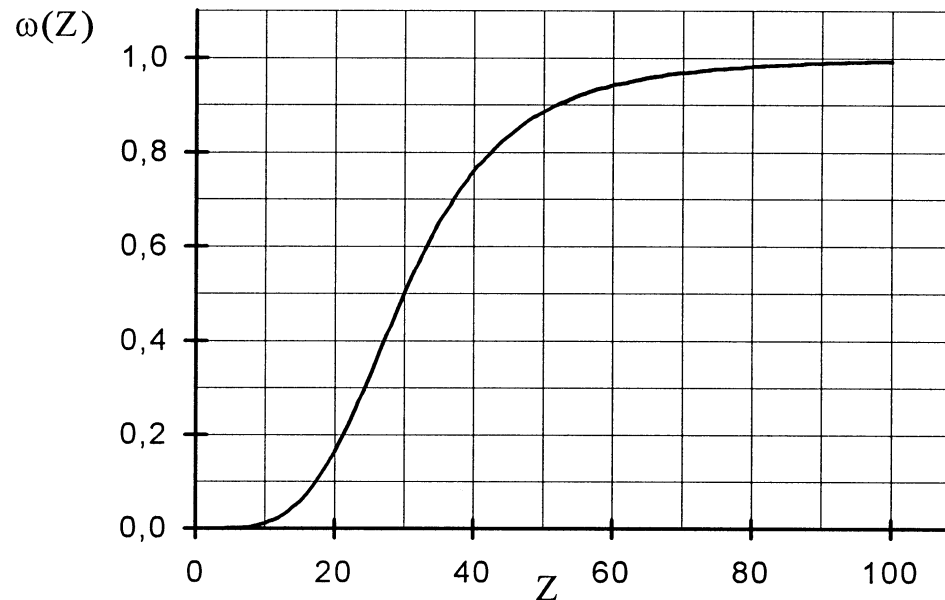
## Sekundärreaktionen nach Anregung und Ionisation von Atomhülle



Schematische Darstellung der Anregung (a), der Abregung mit Photonenemission (b), der Abregung mit Augerelektronenemission (c) und der Ionisation (d) eines Hüllenelektrons mit anschließendem Auffüllen des Elektronenloches in der inneren Schale (gestrichelte Linie). Beim Rücksprung eines Elektrons aus einem angeregten Zustand kann die Differenz der Bindungsenergien in Form charakteristischer Photonenstrahlung (b) oder durch Augerelektronenemission (c) vernichtet werden. In beiden Fällen ist die emittierte Strahlungsenergie charakteristisch für das Atom.

## Augerelektronenemission

$$\omega + \alpha = 1$$



Relative Ausbeute  $\omega(Z)$  für die K-Schalen-Fluoreszenz in Abhängigkeit von der Ordnungszahl  $Z$  des Absorbers, für die K-Schalen-Augerausbeute gilt  $\alpha = 1 - \omega$ .

## Atomhülle

### Zusammenfassung:

- Atomhüllen werden in diesem Buch mit Hilfe des Bohrschen Schalenmodells beschrieben. Danach befinden sich Elektronen auf Schalen um den Atomkern, die von innen nach außen fortlaufend von  $n = 1$  an numeriert werden. Sie werden als K-, L-, M-Schalen bezeichnet.
- Die maximal mögliche Anzahl von Elektronen auf einer Schale  $n$  ist  $2n^2$ .
- Durch Energieübertragung können Elektronen von ihrem Stammsplatz aus in höherenergetische Zustände angeregt werden.
- Wird mindestens die Bindungsenergie der Elektronen zugeführt, so wird das Atom ionisiert. Am ursprünglichen Elektronenplatz bleibt wie bei der Anregung ein Elektronenloch zurück.
- Beim Auffüllen des Elektronenloches durch äußere Elektronen wird die Energiedifferenz in Form von charakteristischer Photonenstrahlung frei oder auf Augerelektronen übertragen.
- Die relativen Ausbeuten hängen von der Ordnungszahl und den beteiligten Schalen ab.





## Atomkern

Der Atomkern besteht aus  $Z$  Protonen und  $N$  Neutronen. Protonen und Neutronen werden zusammen als Kernteilchen (Nukleonen) bezeichnet. Die Kernladungs- oder Ordnungszahl  $Z$  gibt die Zahl positiver Elementarladungen  $e_0$  im Atomkern an. Die Gesamtzahl der Nukleonen im Kern wird durch die Nukleonen- bzw. Massenzahl  $A$  angegeben.

$$A = Z + N$$

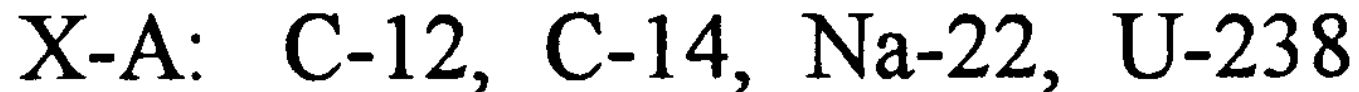
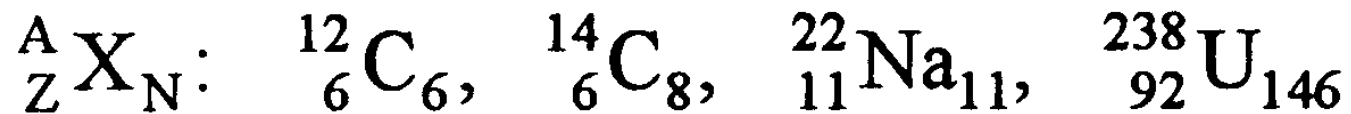
Die **Elementarladung** ist die kleinste elektrische Ladungsmenge. Freie Ladungen kommen in der Natur nur als ganzzahlige positive oder negative Vielfache der Elementarladung vor. Positive Elementarladungen befinden sich z. B. auf dem Proton, dem Pion und dem Positron, eine negative auf dem Elektron. Ladungen verschiedenen Vorzeichens neutralisieren sich. Der Zahlenwert der Elementarladung beträgt  $e_0 = 1.6021892 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Die Bezeichnung **Proton** für den Atomkern des einfachsten Wasserstoffatoms geht auf Lord Rutherford zurück, der diesen Namen (er kommt aus dem Griechischen und bedeutet: das Erste) 1919 einführte.

Das **Neutron** wurde 1920/21 von Lord Rutherford aus theoretischen Gründen vorhergesagt. Experimentell entdeckt wurde es 1932 durch James Chadwick (1891 - 1974), der dafür 1935 den Physiknobelpreis erhielt.



## Kennzeichnung der Atomkerne



## Kerndimensionen

$$R_{\text{kern}} = r_0 \cdot A^{1/3} \quad \text{mit} \quad r_0 = 1.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

$r_0$ : Radius der Nukleonen

$$r_{\text{H\u00fclle}}/r_{\text{Kern}} \approx 10'000 : 1 \quad \text{bis} \quad 100'000 : 1$$

Bsp.: da  $r_{\text{H\u00fclle}} = \text{ca. } 10^{-10} \text{ m}$  gilt  
falls  $r_{\text{Kern}} = 10 \text{ cm} \rightarrow r_{\text{H\u00fclle}} = 1 \text{ km bis } 10 \text{ km}$

**Beispiel** ∴ Der Radius eines J-131-Atomkernes betr\u00e4gt nach Gl. (2.21)  $r(131\text{-J}) = 6.6 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ , der Kernradius eines Uranatoms ist  $r(238\text{-U}) = 8.06 \cdot 10^{-15} \text{ m}$  und der Kernradius eines leichten Sauerstoff-16-Kernes ist  $r(16\text{-O}) = 3.3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ .



## Atomkernstruktur

- starke Wechselwirkungskräfte zwischen Nukleonen (ca. 100 mal grösser als Coulombabstossung)
- kurzreichweitige Paarkräfte zwischen einzelnen Nukleonenpaaren
- dichte Raumanordnung der Nukleonen

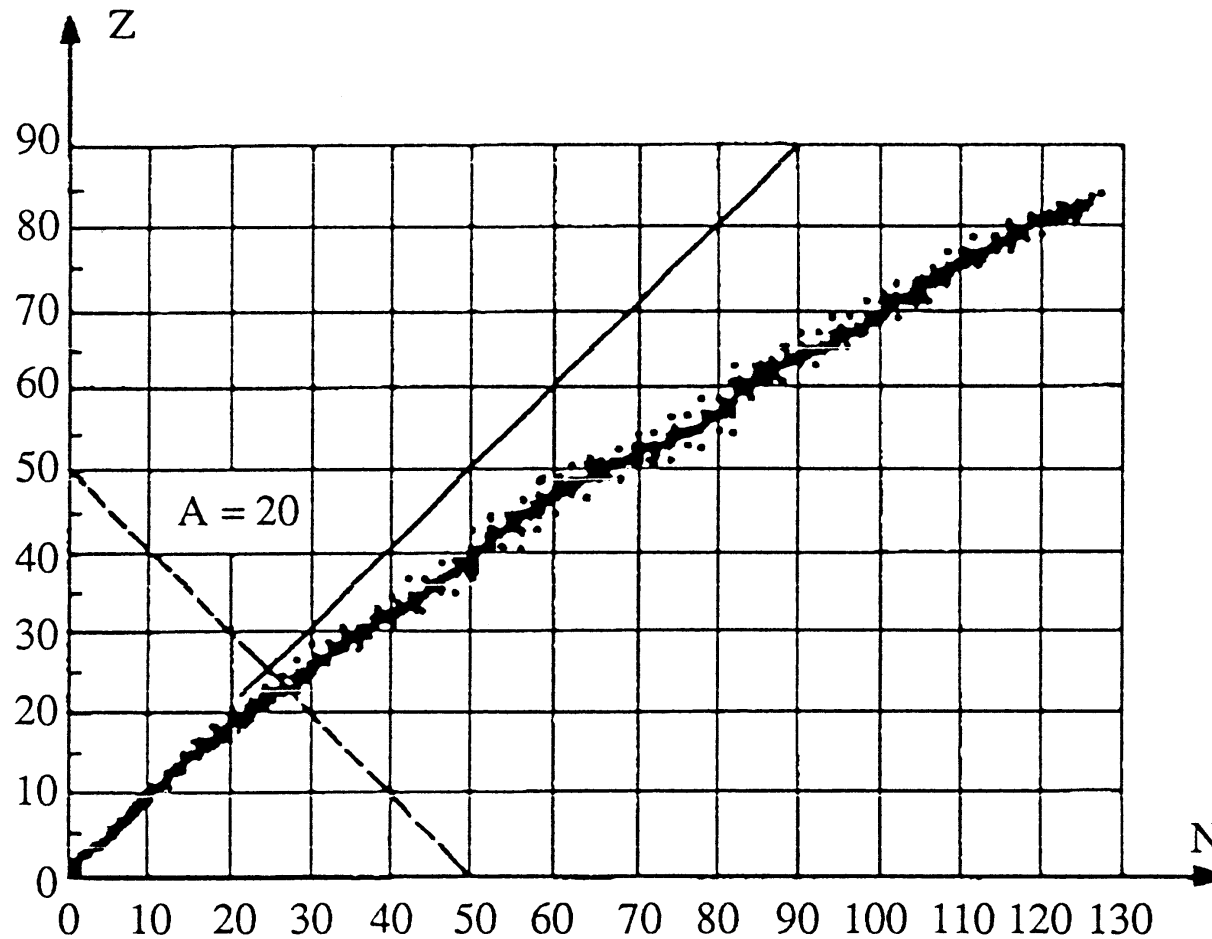


## Atomkernstruktur

- Flüssigkeitströpfchen-Modell
- Kernschalenmodell
- Fermigas-Modell
- Kollektives Kernmodell
- Optische Kernmodell



## Atomkernstabilität



## Atomkerne

### Zusammenfassung:

- **Atomkerne sind aus Neutronen und Protonen zusammengesetzt, die durch die sogenannte starke Wechselwirkung aneinander gebunden sind.**
- **Die starke Wechselwirkung ist eine kurzreichweitige Paarkraft, die Nukleonen in unmittelbarem Kontakt aneinander bindet. Kernmaterie hat deshalb eine extrem hohe Dichte.**
- **Mit zunehmender Massenzahl wird für stabile Kerne ein anwachsender Neutronenüberschuß benötigt, der bei schweren Kernen bis etwa 50% betragen kann.**
- **Wegen des Fehlens einer zentralen Kernkraft werden Atomkerne durch eine Reihe quantitativer Kernmodelle beschrieben, die je nach Anwendungszweck ausgewählt werden und jeweils nur Teilaspekte der Kernphysik beschreiben können.**
- **Das Tröpfchenmodell hat sich als ein für Energieberechnungen sehr geeignetes Kernmodell erwiesen, das sowohl die Stabilität als auch die Instabilität (Radioaktivität) von Atomkernen quantitativ vorhersagen kann.**
- **Kerne können wie Atomhüllen durch Energiezufuhr in höherenergetische Zustände angeregt werden. Beim Zerfall bzw. der Abregung dieser Zustände kommt es zur Emission charakteristischer Kernstrahlung, die in der Regel Gammastrahlung ist.**
- **Wird ausreichend Energie zugeführt, können Kerne auch zur Emission von Nukleonen veranlaßt werden. Dazu ist mindestens die Zufuhr der Separationsenergie des entsprechenden Nukleons nötig.**





# Das Atom

**Dr. R. Mini**