

**Auger-Elektronen-Spektroskopie** ist eine Standardanalysetechnik der Oberflächen und Interface-Physik zur Überprüfung

- a) Reinheit
- b) Oberflächenchemische Zusammensetzung
- c) Tiefenprofile durch Abtragung (Sputtering)

Die austretenden Sekundärelektronen werden energetisch analysiert.

**Photoelektronenspektroskopie** ist ähnlich wie Augerspektroskopie nur werden statt einem Primärelektronenstrahl Photonen zur Anregung verwendet, die genügend Energie besitzen Elektronen aus dem Halbleiter aus den inneren Schalen der Atome zu entfernen. Die austretenden Elektronen werden dann ähnlich wie bei AES energieabhängig gemessen.

Bei der Photoemissionspektroskopie unterscheidet man je nach Anregungslicht

- a) **UPS** (Ultraviolet photo emission spectroscopy)  
hier wird Strahlung einer He Entladungslampe, die entweder bei 21.2eV oder bei 40.8 eV emittiert verwendet
- b) **XPS** (X-ray photo emission spectroscopy) = **ESCA** (electron spectroscopy for chemical analysis)  
Strahlung einer Röntgenröhre mit Aluminium- oder Magnesiumanode

in beiden Fällen ist  $E_k = h\nu - E_B$

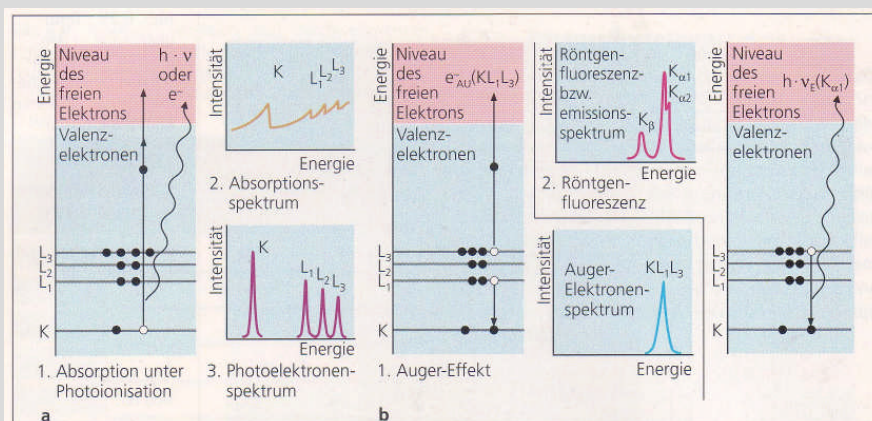


Abb. 6.26 Wechselwirkungen zwischen Atomen und Röntgenstrahlen bzw. Elektronen. (a) Primärprozesse, (b) Sekundärprozesse.

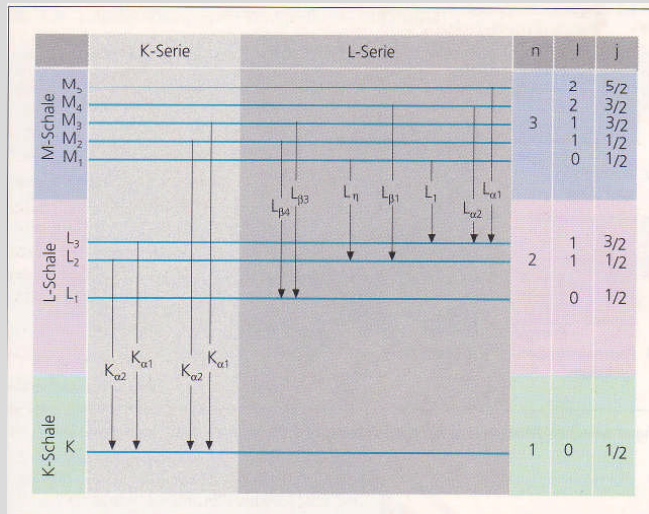


Abb. 6.25 Termübergänge in den inneren Elektronenschalen (Energieschema für die einzelnen Röntgen-Emissionslinien der K- und L-Serien)  
 n: Hauptquantenzahl,  
 l: Nebenquantenzahl,  
 j: magnetische Quantenzahl

Hauptquantenzahl n: 1,2,3, ...  
 Drehimpulsquantenzahl l: 0, ..., (n-1)  
 Richtungsquantenzahl (Spinquantenzahl) j: (-l, -l+1, ..., l-1, l)

apl.Prof. Dr. D.J. As

**Table 2.2** Atomic and X-ray notations

Quantum numbers	l	j	Atomic notation	X-ray suffix	X-ray notation
1	0	1/2	1s	1	K
2	0	1/2	2s	1	L <sub>1</sub>
2	1	1/2	2p <sub>1/2</sub>	2	
2	1	3/2	2p <sub>3/2</sub>	3	L <sub>2,3</sub>
3	0	1/2	3s	1	M <sub>1</sub>
3	1	1/2	3p <sub>1/2</sub>	2	
3	1	3/2	3p <sub>3/2</sub>	3	M <sub>2,3</sub>
3	2	3/2	3d <sub>3/2</sub>	4	
3	2	5/2	3d <sub>5/2</sub>	5	M <sub>4,5</sub>
4	0	1/2	4s	1	N <sub>1</sub>
4	1	1/2	4p <sub>1/2</sub>	2	
4	1	3/2	4p <sub>3/2</sub>	3	N <sub>2,3</sub>
4	2	3/2	4d <sub>3/2</sub>	4	
4	2	5/2	4d <sub>5/2</sub>	5	N <sub>4,5</sub>
4	3	5/2	4f <sub>5/2</sub>	6	
4	3	7/2	4f <sub>7/2</sub>	7	N <sub>6,7</sub>

See e.g. Kuhn 1969.

Hauptquantenzahl n: 1,2,3, ...  
 Drehimpulsquantenzahl l: 0, ..., (n-1)  
 Richtungsquantenzahl (Spinquantenzahl) j: (-l, -l+1, ..., l-1, l)

apl.Prof. Dr. D.J. As

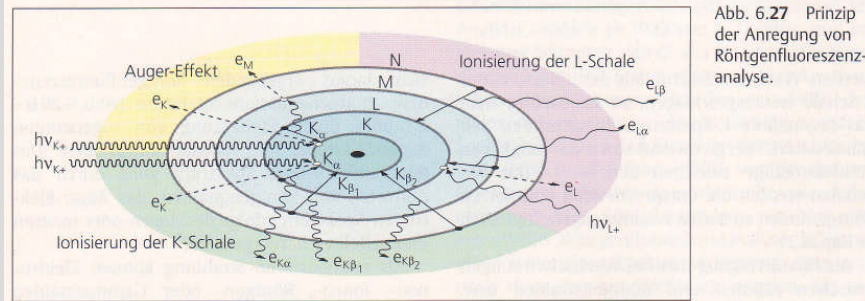
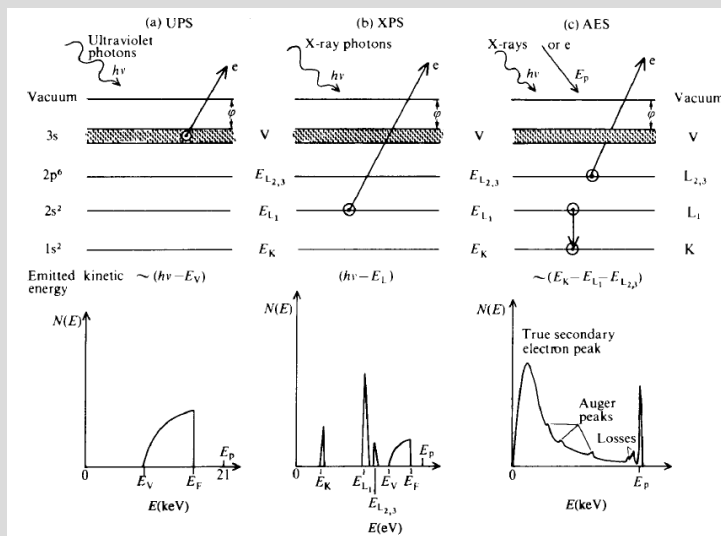
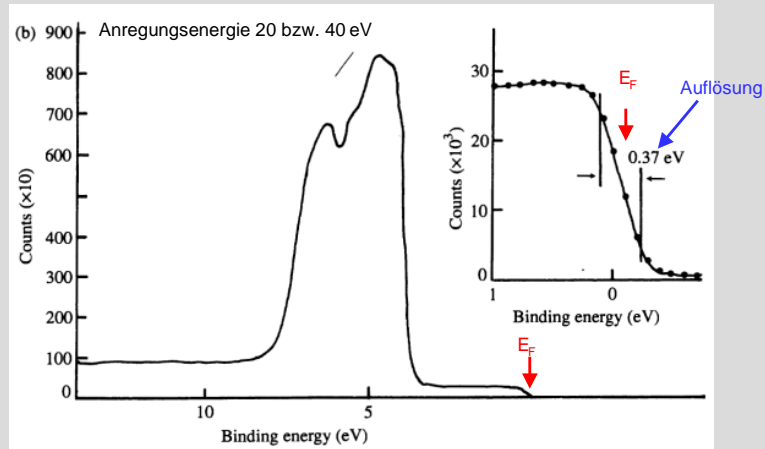


Abb. 6.27 Prinzip der Anregung von Röntgenfluoreszenzanalyse.

apl.Prof. Dr. D.J. As



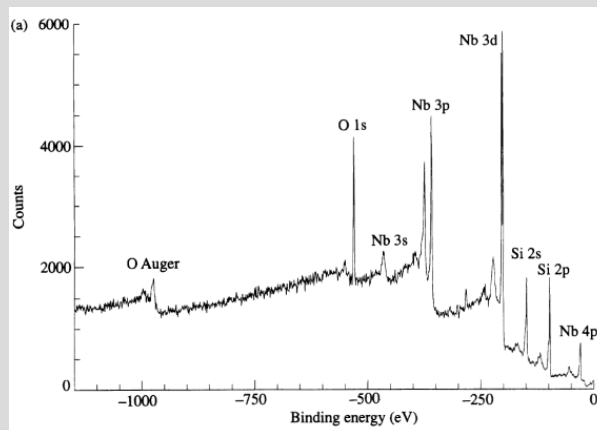
apl.Prof. Dr. D.J. As



Die Anregungsenergie ist zu niedrig um Elektronen aus den inneren Atomshalen anzuheben. Deshalb eignet sich diese Methode nur zur Untersuchung der äußeren Schalen bzw. in Halbleitern zur Untersuchung von Valenzbandstrukturen oder auch Austrittsarbeiten von Metallen.

Diese kann aber mit größerer Genauigkeit  $\rho = \Delta E/E$  gemessen werden ( $\rho \sim 0.1$  eV)

apl.Prof. Dr. D.J. As



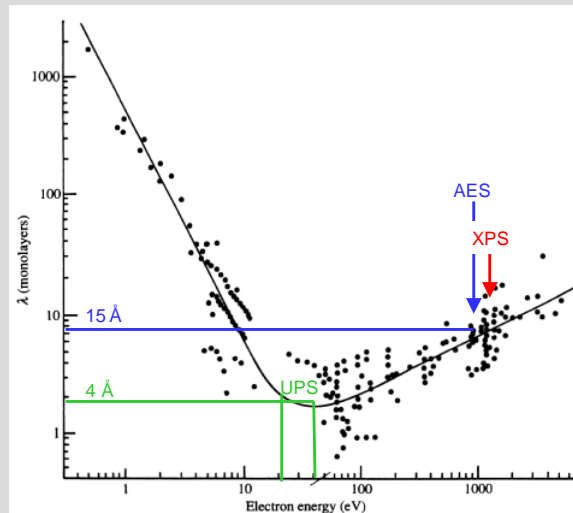
Für XPS ist die Anregungsenergie meistens bei 1.487 keV (Al) oder 1.254 eV (Mg). Damit können schon Elektronen aus dem Kerninneren angehoben werden, die sich im Energiespektrum in scharfen charakteristischen Linien äußern. Anhand der scharfen Linien kann die chemische Identifikation erfolgen.

XPS = ESCA = electron spectroscopy for chemical analysis

Neben der chemischen Analyse kann XPS auch zur Untersuchung der Valenzbandstruktur verwendet werden, die Auflösung ist jedoch schlechter als bei UPS.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Die **Oberflächenempfindlichkeit** der Photoelektronenmethode hängt jedoch nicht von der Eindringtiefe der einfallenden Strahlung ab, sondern eher davon wie Wahrscheinlich es ist, dass ein einmal erzeugtes Elektron fähig ist zur Oberfläche ohne Energieverlust hinzukommen



Verschiedene Energieverlust-mechanismen:

1. Streuung an Gitterphononen
2. Elektron-Elektron-Wechselwirkung (kollektive Dichtefluktuationen -> Plasmonen) Volumens- und Oberflächenplasmonen 5-25eV
3. Verschiedene Ein- und Zweiteilchenanregung, d.h. ein  $e^-$  verliert Energie dadurch, dass es ein zweites Elektron aus seinem Grundzustand in einen leeren Zustand im Festkörper anhebt (z.B. Interbandübergänge etc.) oder anderes Photoelektron

→ Auger Prozesse!

apl.Prof. Dr. D.J. As

Der Nettoeffekt dieser inelastischen Prozesse ist schwierig zu berechnen, aber es ist bekannt, dass in Metallen und Halbleitern der mittlere freie Weg eines Elektrons von der inelastischen Streuung mit seiner kinetischen Energie variiert.

- bei sehr niedrigen Energien ist das Elektron unfähig einen der oben erwähnten Streuprozess anzuregen und die mittlere freie Weglänge ist deshalb sehr groß.
- bei sehr hohen Energien nimmt der Einfangsquerschnitt für die Anregung des Verlustterms wieder ab und damit nimmt die mittlere freie Weglänge wieder zu.

Die experimentelle Bestimmung der Fluchtdistanz eines Elektrons führt aber leider nicht zu einer Größe die direkt vergleichbar ist mit der inelastischen freien Weglänge. Dies liegt daran, dass das Experiment die Abschwächung der Anzahl der austretenden Elektronen mißt, wenn die Dicke der oberen Schicht variiert wird. Die Abschwächung enthält aber sowohl den elastisch als auch den inelastischen Streuprozess.

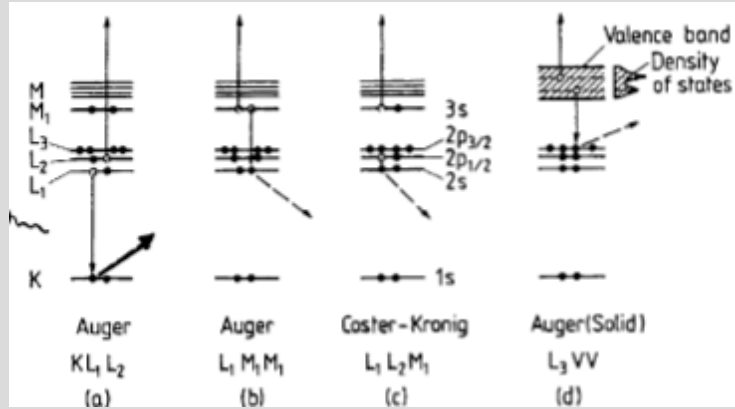
Die Abschwächungslänge hat ein Minimum bei einer Tiefe von ca. 1 nm bei einer Energie von ca. 40eV. Auch bei 1 keV ist die Abschwächungslänge in Metallen wahrscheinlich kleiner als 2 nm ( d.h. ca. 10 atomare Monolagen (1 ML ~ 2.5 Å)

→ **Oberflächensensitivität der Photoelektronen ändert sich mit kinetischer Energie**

UPS, XPS und Auger haben unterschiedliche Oberflächensensitivität

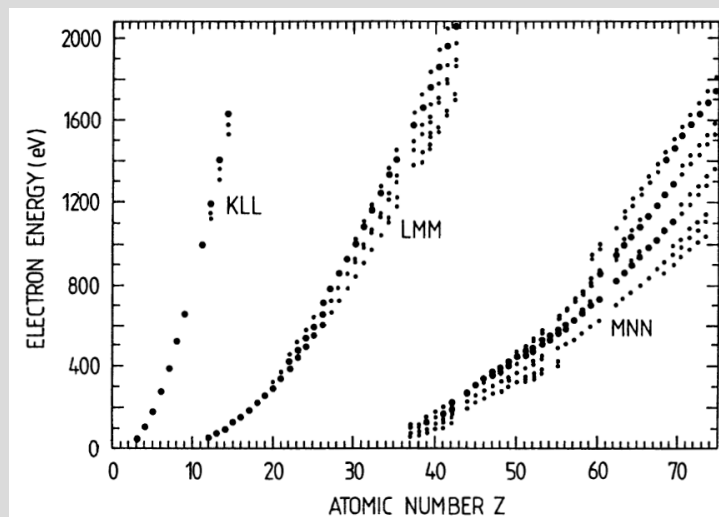
apl.Prof. Dr. D.J. As

Erklärung des Auger-Prozesses auf der Basis der Energieniveaus



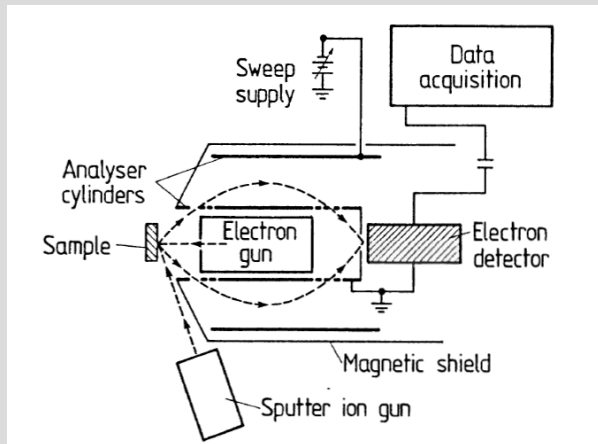
Ein Primärelektron erzeugt ein anfängliches Loch im Kern und das entkommene Elektron wird durch einen strichlierten Pfeil dargestellt. Ein anderes Elektron fällt aus einem höheren Niveau oder aus dem Valenzband in die Elektronenlücke. Diese freiwerdende Energie wird einem dritten Elektron – dem Auger-Elektron – mitgegeben, das den Halbleiter verläßt.

apl.Prof. Dr. D.J. As



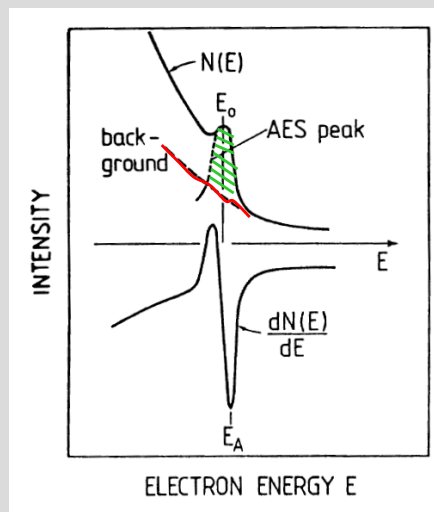
Die stärksten Übergänge jedes Elements sind durch dickere Punkte gekennzeichnet.

apl.Prof. Dr. D.J. As



Die Primärelektronen werden durch eine Elektronenkanone erzeugt, die auf der zentralen Achse des Zylinderspiegelanalysator integriert ist. Eine zusätzliche Zerstäubungskanone ermöglicht eine Tiefenanalyse.

apl.Prof. Dr. D.J. As



Qualitativer Vergleich eines nicht differenziert Auger Spektrums  $N(E)$  mit dem differenzierten Spektrum. Die AES-Signalspitze bei  $E_0$  erzeugt eine „Resonanz“-ähnliche Struktur in  $dN/dE$ , deren am meisten negative Wert bei  $E_a$  der steilsten Steigung von  $N(E)$  entspricht.

Die Ableitung mit Lock-in Technik:

Wechselspannung  $v$  an die Zylinderspannung  $V$ :

$$v = V_0 \cdot \sin(\omega t)$$

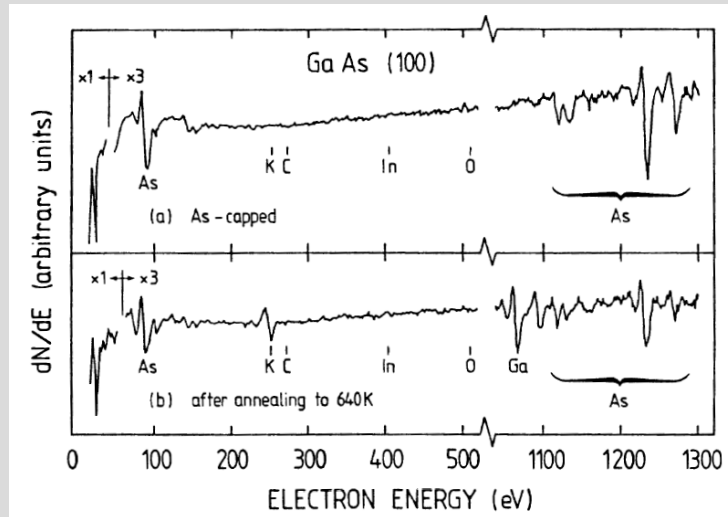
$$I(V + V_0 \cdot \sin(\omega t)) \cong I_0 + \frac{dI}{dV} \cdot V_0 \cdot \sin(\omega t) + \dots$$

1. Ableitung  
Phasensensitive bei  $\omega$  gemessen

apl.Prof. Dr. D.J. As

Differenziertes AES  $dN(E)/dE$  einer mit MOMBE präparierten GaAs (001) Oberfläche gemessen mit einer Primärelektronenenergie von 2 KeV

Probe wurde an Luft von der MBE Anlage zur AES-Anlage transferiert.



mit As - Abdeckung

nach As - Desorption