

# Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS)

## 1 Einleitung

XPS ist zurzeit eine der am häufigsten verwendeten Oberflächenanalysemethoden. Man erhält Informationen über die Elementzusammensetzung der Oberfläche und über den chemischen Bindungszustand dieser Elemente. Die Informationstiefe liegt dabei im Bereich bis zu 3 nm. Ein Nachteil dieser Methode besteht in der mangelnden lateralen Auflösung fast aller Spektrometer (mit Ausnahme der neuen „small spot“-Geräte), so dass nur der Mittelwert der Zusammensetzung der Gesamtoberfläche ermittelbar ist. Außer für Festkörperoberflächen lässt sich XPS auch zur Untersuchung von Atomen und Molekülen in der Gasphase anwenden.

## 2 Messprinzip

Die Photoelektronenspektroskopie beruht auf dem Photoeffekt: Durch Anregung mit Photonen werden aus Atomen, Molekülen oder Festkörpern Elektronen emittiert, deren kinetische Energie bestimmt wird. Je nach Anregungsquelle unterscheidet man zwischen XPS (X-Ray Photoelectron Spectroscopy, Anregung mit Röntgenstrahlung,  $E_{\text{prim}} > 100\text{eV}$ ) und UPS (Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy, Anregung mit UV-Strahlung,  $E_{\text{prim}} \leq 100\text{eV}$ ). Obwohl mit Synchrotronstrahlung heutzutage eine kontinuierliche Anregungsquelle zur Verfügung steht, wird diese Unterscheidung beibehalten, da man bei XPS v.a. die Rumpfelektronen, bei UPS aber die Valenzelektronen spektroskopiert und sich deshalb die erhaltenen Informationen in charakteristischer Weise unterscheiden. XPS-Experimente werden dabei häufig zur chemischen Analyse herangezogen, wodurch sich der Name ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) ergab.

## 3 Versuchsaufbau

### 3.1 Röntgenquellen

Die Röntgenquelle (Abbildung 1) besteht aus einer Kathode (Filament), die beim Erhitzen (üblicherweise 2-3 A Filamentstrom) Elektronen aussendet. Die Elektronen werden durch ein hohes elektrisches Feld mit typischerweise 10-15 kV auf eine Metallanode beschleunigt. An der Metallanode kann durch zwei Prozesse Röntgenstrahlung entstehen:

- Durch Abbremsen der hochenergetischen Elektronen im elektrischen Feld der Atome wird der Verlust an kinetischer Energie als Röntgenstrahlung ausgesendet. Diese Strahlung wird „weiße Röntgenstrahlung“ oder „Röntgenbremsstrahlung“ genannt und ist wegen ihres kontinuierlichen Spektrums nicht erwünscht. Sie wird z.B. durch Einbau eines Al-Fensters zwischen Anode und Probe abgeschwächt (s.u.).

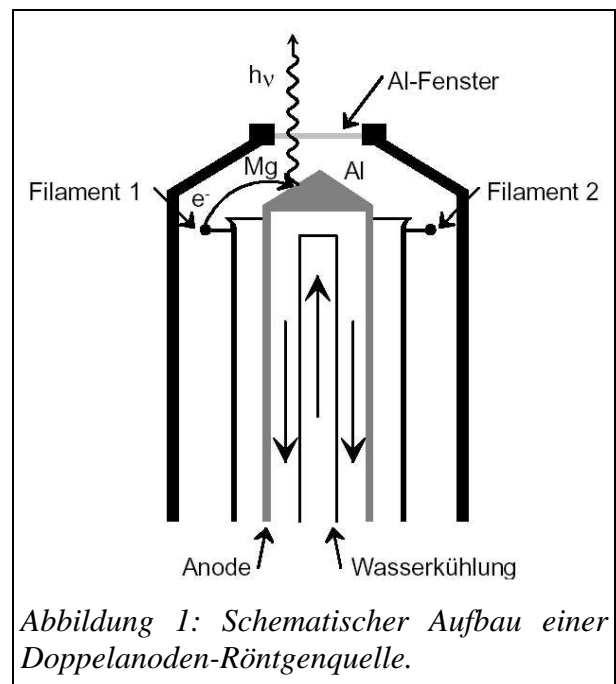


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer Doppelanoden-Röntgenquelle.

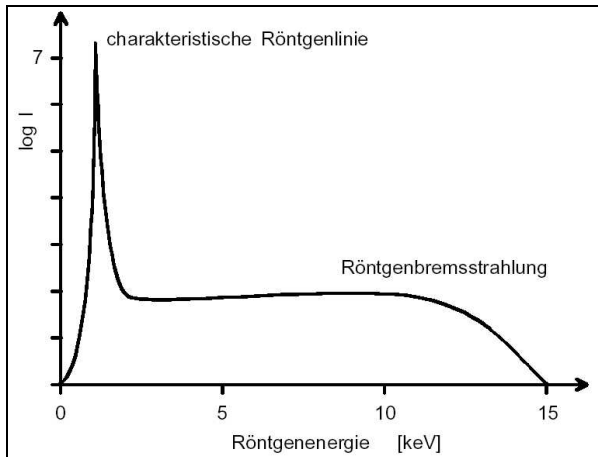


Abbildung 2: Röntgenspektrum von Aluminium nach Beschuss durch Elektronen mit  $E_{prim} = 15 \text{ keV}$ .

b) Durch elastischen Stoß der auf die Anode treffenden Elektronen werden aus den Atomen der Anode an diese gebundene Elektronen emittiert. Die so entstehenden charakteristischen Röntgenlinien sind der Bremsstrahlung überlagert (Abbildung 2). Diese Röntgenstrahlung wird als Anregungsquelle für XPS verwendet.

In vielen Röntgenquellen stehen mehrere Anoden zur Verfügung (meist Mg und Al, aber auch Zr, Si, Ti), da ein Wechsel der Energie der anregenden Strahlung aus unterschiedlichen Gründen sinnvoll sein kann. Bei Bedarf kann die natürliche Linienbreite der charakteristischen Röntgenstrahlung durch Monochromatoren noch reduziert werden.

Als Quelle kontinuierlicher Röntgenstrahlung

stehen Synchrotrons zur Verfügung. Synchrotronstrahlung besitzt hohe Intensität, ist stark fokussiert und polarisiert und lässt sich gut pulsen.

### 3.2 Elektronen-Energie-Analysator

Der Analysator trennt die Photoelektronen nach ihrer kinetischen Energie. Analog zu optischen Linsensystemen lassen sich auch Elektronenlinsensysteme aufbauen. Abbildung 3 zeigt eine experimentell einfache Anordnung für einen Elektronenmonochromator. Bei diesem hemisphärischen Analysator („Concentric hemispherical Analyser“, CHA) fallen Elektronen durch den Eintrittsspalt mit verschiedenen Energien ein. Elektronen mit zu wenig Energie werden von der auf positiven Potential liegenden Innenkugel angezogen; Elektronen mit zu viel Energie prallen auf die Außenkugel, die auf negativem Potential liegt. Nur Elektronen mit einer bestimmten, durch Analysatorpotentiale einstellbaren Energie beschreiben eine Kreisbahn und gelangen an den Detektor. Der Vorteil dieses Analysortyps gegenüber älteren Bauarten (z.B. Plattenspiegelfeld-Analysator) ist seine Toleranz gegenüber Einfall von Elektronen mit einem Winkel kleiner  $\delta\alpha$ , die alle in den Detektor fokussiert werden.

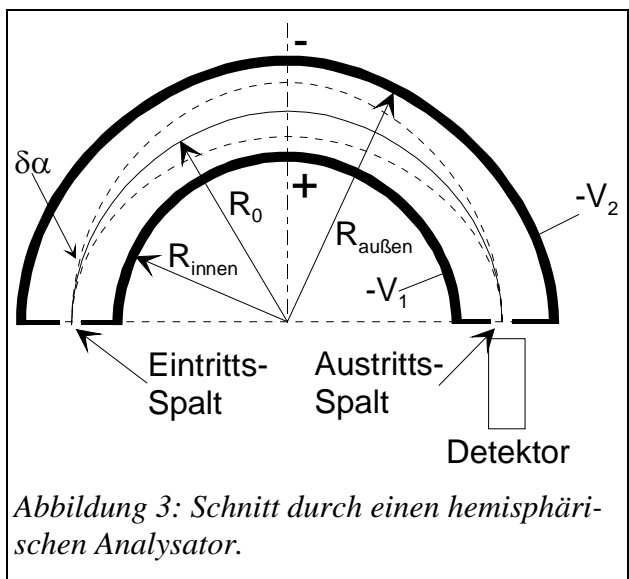


Abbildung 3: Schnitt durch einen hemisphärischen Analysator.

### 3.3 Detektoren

Als Detektoren für Elektronen dienen im einfachsten Fall Kollektoren in der Form eines Faraday-Käfigs oder einer ausgedehnten Elektrode zur direkten Strommessung. Dabei müssen durch Formgebung, Potentiale und Schutz-elektroden die Fehler durch Sekundärelektronenemission oder durch andere freie Streuelektronen vermieden werden. Bei geringen Stromstärken kann der Strom über einen offenen Sekundärelektronenvervielfacher (SEV) mit typischerweise 10-16 einzelnen Dynoden oder mit kontinuierlichem Kanal („Channeltron“) verstärkt werden (siehe Abbildung 4). Bei Strömen unter  $10^{-14}\text{A}$  wird der Strom durch Zählen der Pulse am Detektorausgang bestimmt, wobei weniger als ein Elektron pro Sekunde am Detektoreingang noch messbar ist.

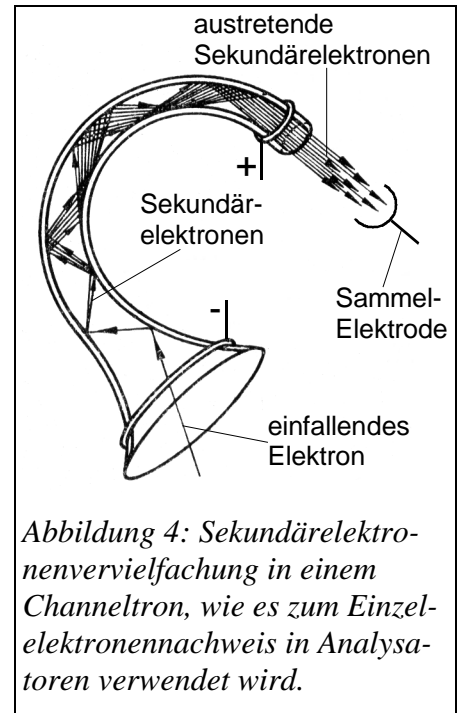


Abbildung 4: Sekundärelektronenvervielfachung in einem Channeltron, wie es zum Einzel-elektronennachweis in Analysatoren verwendet wird.

## 4 Theorie

Für Festkörper ergibt sich für die kinetische Energie der emittierten Elektronen  $E_{kin}$ :

$$(1) \quad E_{kin} = h\nu - E_{Bind} - \phi$$

Die Bindungsenergie  $E_{Bind}$  wird auf das Fermi-Niveau  $E_F$  bezogen, wobei man annimmt, dass während des Emissionsprozesses die elektronische Struktur des neutralen Teilchens unverändert bleibt (Koopmansches Theorem). Für Atome oder Moleküle wird die Bindungsenergie von Elektronen i.a. auf das Vakuumniveau  $E_{Vac}$  bezogen.

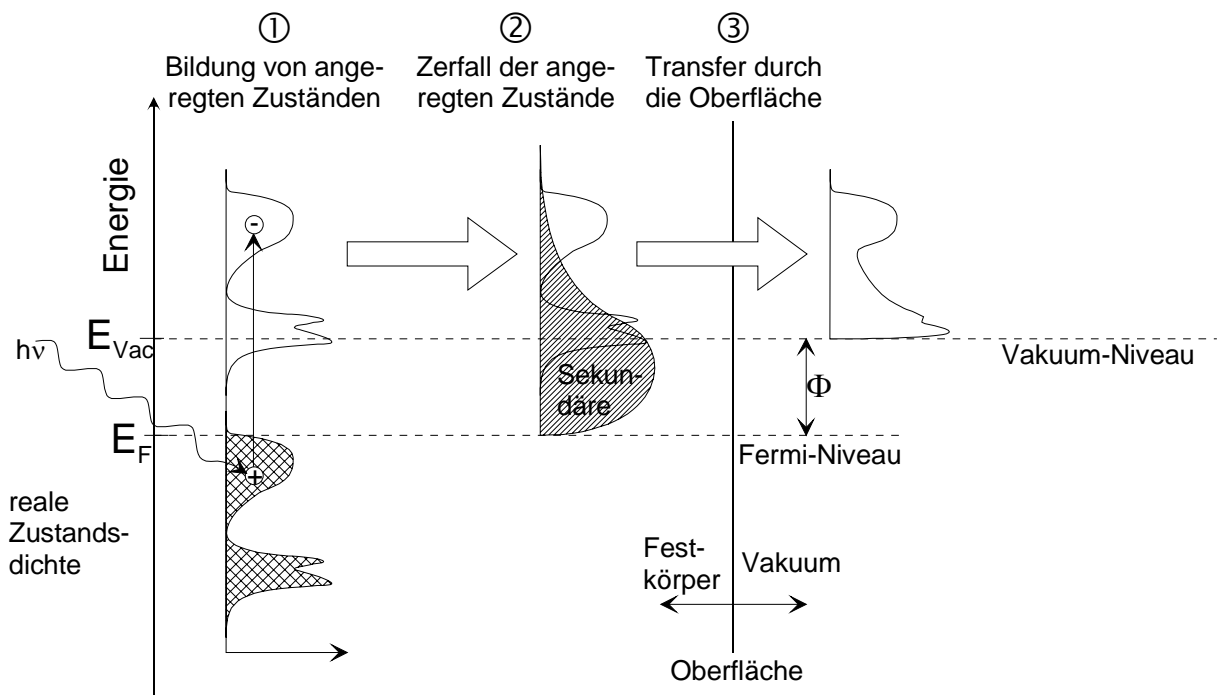


Abbildung 5: Veranschaulichung des Photoemissionsprozesses in einem 3stufigen Modell.

Der Photoemissionsprozess in einem Festkörper kann in einem 3stufigen Prozess verstanden werden (siehe Abbildung 5):

- ① Zunächst werden durch die Absorption von Photonen die Elektronen aus einem gebundenen Zustand in einen angeregten Zustand transferiert. Da das für alle gebundenen Elektro-

- nen gleichermaßen gilt, wird die reale Zustandsdichte (kariert in Abbildung 5) als Dichte von angeregten Zuständen in dem Festkörper regelrecht abgebildet.
- ② Da die angeregten Elektronen mit einer kin. Energie von  $E_{\text{kin}} > E_F$  nicht mehr lokalisiert sind, können sie sich frei in dem Festkörper bewegen. Dabei kommt es zur Interaktion mit noch gebundenen Elektronen, was einerseits Sekundärelektronen geringerer Energie erzeugt (schraffiert in Abbildung 5) und andererseits die Lebensdauer der angeregten Elektronen und damit ihre mittlere freie Weglänge einschränkt.
  - ③ Die Elektronen bewegen sich isotrop im Festkörper. Elektronen, die nahe genug an der Oberfläche waren können auch emittiert werden, womit es zum eigentlichen Photoemissionsprozess kommt. Dabei müssen die Elektronen noch die nur an der Oberfläche existierende Austrittsarbeit  $\Phi$  überwinden. Elektronen mit  $E_{\text{kin}} < E_{\text{vac}}$  werden nicht aus dem Festkörper entlassen.

Abbildung 6 zeigt ein typisches Übersichtsspektrum einer Festkörperoberfläche, das bei Röntgenbeschuss erhalten wird und neben XPS-Peaks auch andere Strukturen und Informationen aufweist.

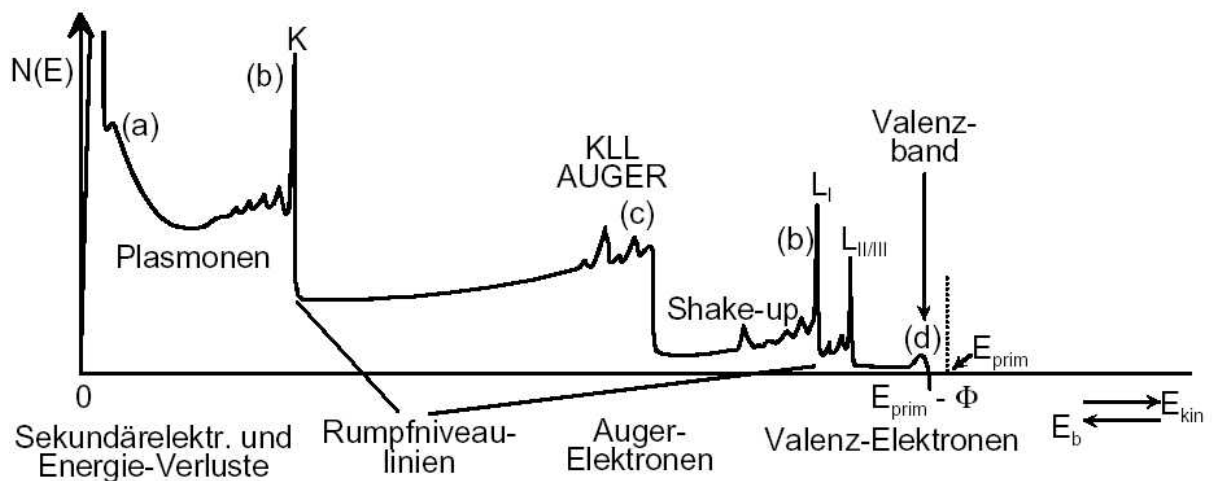


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines typischen Übersichtsspektrums

Im Bereich hoher kinetischer Energien der Elektronen (rechts im Spektrum) treten zunächst typische Strukturen durch Photoemission aus dem Valenzband auf, die charakteristisch sind für die Bindungen der Atome. Bei niedrigeren Energien erscheinen die Rumpfniveaulinien  $L_I / L_{II/III}$  und  $K$ , die der Emission von Elektronen aus  $L$ - bzw.  $K$ -Schalen entsprechen und häufig Satellitenpeaks durch Plasmonenanregung oder Shake-up-Prozesse besitzen. Außerdem treten in diesem Bereich auch Augerpeaks auf, da der Augerprozesse ein Folgeprozess der Photoemission ist. Auf der niederenergetischen Seite (links im Spektrum) werden Sekundärelektronen und Elektronen, die elektronische oder vibronische Verluste erlitten haben, registriert. In den folgenden Abschnitten soll dargestellt werden, welche Informationen man aus einem solchen Spektrum erhalten kann.

#### 4.1 Qualitative Analyse

Ein Vorteil der Röntgenphotoemissionsspektroskopie liegt darin, dass die effektive Ladungsverteilung am Ort des Zentralatoms erfasst wird und damit auch Informationen über den Bindungstyp des jeweiligen Elements erhalten werden können. Die tatsächlich ermittelte Bindungsenergie  $E_{\text{Bind,eff}}$  hängt dabei von verschiedenen Termen ab:

$$(2) \quad E_{\text{Bind,eff}} = E_{\text{Bind}} + \Delta E_{\text{Chem}} + \Delta E_{\text{Mad}} + \Delta E_{\text{relax}}$$

Von diesen vier Termen, die  $E_{\text{Bind}}$  verschieben können, ist die sog. chemische Verschiebung  $\Delta E_{\text{Chem}}$  der wichtigste Term für die qualitative Analyse bei XPS. Er überwiegt die anderen Beiträge in der Regel, kann jedoch auch von den anderen Beiträgen aufgehoben oder sogar überwogen werden. Deshalb seien hier die zwei anderen Beiträge nur stichpunktartig erwähnt:

- $\Delta E_{\text{Mad}}$ : Der Madelung-Term erfasst zusätzlich das elektrische Potential aller Gitterbausteine am Ort des Zentralatoms. Obwohl in erster Näherung oft nur Änderungen der chemischen Verschiebungen beim Vergleich verschiedener Verbindungen diskutiert werden, sind Änderungen im Madelungterm nicht vernachlässigbar. Diese können den Effekt der chemischen Verschiebung u.U. vollständig kompensieren, da der Madelungterm der chemischen Verschiebung entgegenwirkt.
- $\Delta E_{\text{relax}}$ : Für die Relaxationseffekte  $\Delta E_{\text{relax}}$  sind im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Effekten dynamische Prozesse ausschlaggebend. Sie erfassen den Effekt, dass man bei schneller Anregung effektiv eine höhere Bindungsenergie bestimmt als bei einer sehr langsamen. Dies liegt daran, dass man bei schneller Anregung nicht in das Potentialminimum des angeregten Gesamtsystems anregt. Erst anschließend findet nach schneller Anregung eine Relaxation des Systems dadurch statt, dass einerseits das entstandene Loch durch Elektronen aus höheren Schalen aufgefüllt wird und andererseits die übrigen Elektronen eine höhere effektive Bindungsenergie spüren und ihre Energieniveaus deshalb etwas abgesenkt werden.

Zurück zum wichtigsten Term, der chemischen Verschiebung  $\Delta E_{\text{Chem}}$ . Die effektive Ladung des Atoms und der Einfluss der nächsten Nachbarn werden über  $\Delta E_{\text{Chem}}$  bestimmt. Zur quantitativen Auswertung führt man die sogenannte Pauling-Ladung  $q_p$  ein, deren Wert Null ist, wenn dem Zentralatom effektiv die gleiche Zahl von Elektronen zugeordnet werden kann wie dem freien Atom. Die Stärke des Elektronentransfers kann durch den Betrag der Differenz der Elektronegativitäten

$|\chi_{\text{Atom}} - \chi_{\text{Nachbar}}|$  beschrieben werden. Der Elektronentransfer erfolgt dabei immer vom weniger elektronegativen Atom

zum stärker elektronegativen Atom. Die Normierung der Elektronegativitäten erfolgt über  $\chi_{\text{Fluor}} = 4,0$ . Man kann so für verschiedene Moleküle  $E_{\text{Bind}}$  in kontinuierlicher Skala mit  $q_p$  erhalten, wie dies in Abbildung 7 am Beispiel des Cls-Niveaus gezeigt ist.

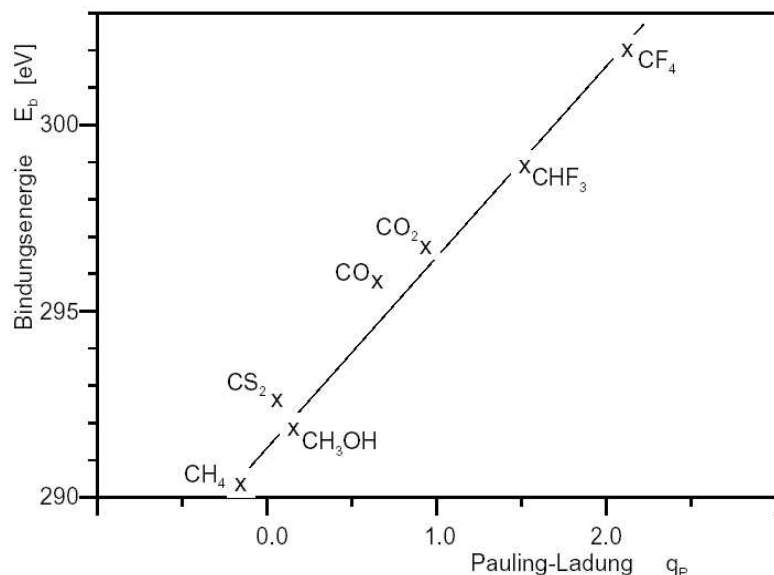


Abbildung 7: Bindungsenergie  $E_{\text{Bind}}$  der Cls-Rumpfelektronen als Funktion der Paulingladung am Kohlenstoff [Sie67].

Außer dem Hauptpeak existieren im Spektrum eine Reihe weiterer sogenannter Satellitenpeaks (vgl. Abbildung 6). Dazu zählen die Shake-up- und Shake-off-Linien, die i.a. einige eV niedrigere kinetische Energie besitzen als der Hauptpeak. Sie resultieren aus Zweielektronenprozessen, bei denen während der Emission des Photoelektrons noch ein weiteres Elektron definiert angeregt wird, so dass das Photoelektron mit entsprechend niedrigerer Energie emittiert wird. Bleibt das zweite Elektron gebunden, so spricht man von Shake-up-, wird es ebenfalls emittiert von Shake-off-Prozessen. Zudem werden im allgemeinen Elektronenenergie-

verlustpeaks in definiertem Energieabstand zu einer XPS-Linie beobachtet, von denen Energieverluste als Folge der Plasmonenanregung die häufigsten sind. Plasmonen sind kollektive Elektronenschwingungen, die durch die Störung des Elektronenkollektivs bei der Emission des Photoelektrons angeregt werden, wodurch dem Elektron definiert Energie fehlt (1-,2-,3-fach...).

Eine Feinstruktur des Hauptpeaks tritt durch Multiplett-Aufspaltung auf. Diese ist zum einen eine Folge der Spin-Spin-Kopplung von Elektronen. Eine andere Ursache für ein Multiplett ist die Spin-Bahn-Kopplung, die die Wechselwirkung des Spins und des Bahndrehimpulses des Elektrons über ihre magnetischen Momente beschreibt. Als Folge dieser Kopplung wird die Entartung von Niveaus mit gleicher Bahn- aber unterschiedlicher Spinquantenzahl aufgehoben. Als Beispiel ist in Abbildung 8 die Aufspaltung des Si2p-Peaks in den Si2p<sub>1/2</sub>- und den Si2p<sub>3/2</sub>-Peak gezeigt. Die Flächen der Peaks verhalten sich dabei zueinander wie die Spinkonzentrationen, 2S+1, gemäß 1:2.

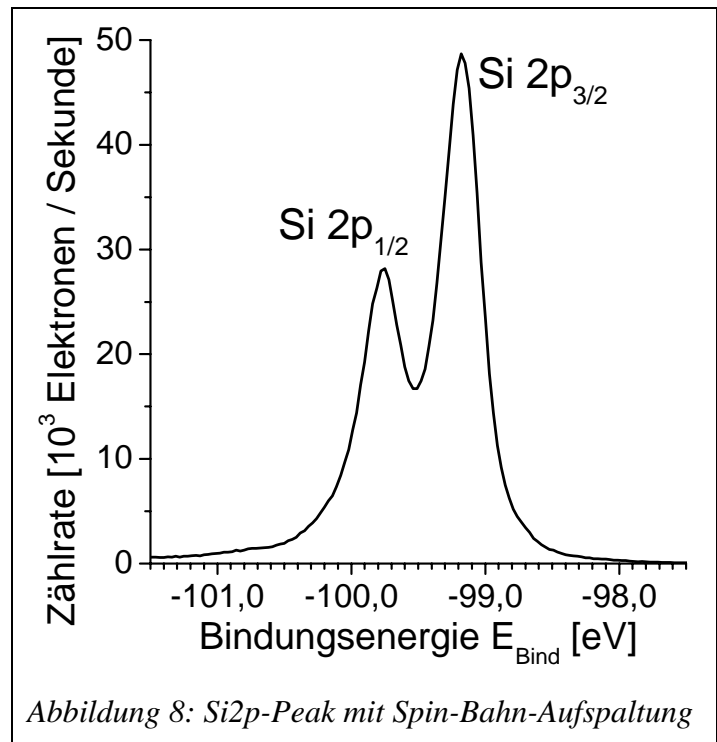


Abbildung 8: Si2p-Peak mit Spin-Bahn-Aufspaltung

## 4.2 Quantitative Auswertung

Der Anteil eines Elements in einer untersuchten Probe ist proportional zur Peakintensität die sich aus der Fläche unter dem Peak abzüglich des Sekundärelektronenuntergrundes ergibt. Da in die Absolute Intensität eines Peaks neben der Konzentration des betreffenden Elementes auch gerätespezifische Faktoren, wie Röntgenintensität und Analysatorempfindlichkeit eingehen, ist es nur schwer möglich, absolute Konzentrationen zu messen. Deshalb werden mit XPS meist Konzentrationsverhältnisse  $N_A/N_B$  des Elementes A zum Element B bestimmt. Unter Beachtung, dass die Übergangswahrscheinlichkeit für die Photoionisation für jedes Element und jedes Rumpfniveau unterschiedlich ist, ergibt sich folgende Formel für die Berechnung des Konzentrationsverhältnisse  $N_A/N_B$  aus dem Verhältnis der gemessenen Peakintensitäten (Peakflächen)  $I_A$  und  $I_B$  :

$$(3) \quad \frac{N_A}{N_B} = \frac{I_A / ASF_A}{I_B / ASF_B}$$

Zu beachten dabei ist, dass die gemessenen Peakintensitäten  $I_A$  bzw.  $I_B$  durch die sog. *Atomic Sensitivity Factors* für die Elemente A bzw. B ( $ASF_A$  bzw.  $ASF_B$ ) dividiert werden müssen. Die ASF enthalten unter anderem die quantenmechanischen Übergangswahrscheinlichkeiten und sind für alle Elemente, Rumpfniveaus und relevanten Anregungsenergien tabelliert (z.B. [XPS92] und [Göp94]).

## 5 Versuchsvorbereitung

Es wird empfohlen, sich zur Versuchsvorbereitung mit charakteristischen Messergebnissen zu beschäftigen. Diese können insbesondere in [Göp94] nachgelesen werden. Weitere, tiefergehende Beispiele finden sich aber auch in [Brig83], [Car78] und [Hüf95].

Darauf aufbauend wird die Beschäftigung mit folgenden Fragen erwartet :

1. Wo kann die Fermi-Energie in einem Photoelektronenspektrum abgelesen werden ? (Hinweis: Das direkte Ablesen ist nur bei Metallen möglich.)
2. Bei der Photoelektronenspektroskopie ist der Untergrund an Sekundärelektronen unvermeidlich (siehe Abbildung 6). Woher rührt der Sekundäruntergrund ?
3. Ein Abziehen des Sekundäruntergrundes zur richtigen Berechnung der Peakflächen ist notwendig. Wie kann ein solcher Untergrund aussehen ? Welche Form sollte dieser Untergrund haben ? (Einbeziehung der Herkunft des Untergrundes / siehe auch [Shi72])
4. Wie kann in einem XPS-Spektrum der Oxydationszustand eines Elementes (z.B. Si) abgelesen werden ?
5. Warum wird zur Eichung des Spektrometers ein möglichst edles Metall benutzt ?
6. Auch quantitative Analysen sind mit XPS möglich. Wie kann mit einer solchen quantitativen Analyse der Anteil von fehlerhaft mehrfach chloriertem Kohlenstoff in einem Polymer (z.B. PVC) ermittelt werden ? (Hinweis: Die einfache Bestimmung des Kohlenstoff-zu-Chlor-Verhältnisses ist hierfür nicht ausreichend, da der Kohlenstoff 1-, 2-, 3- und 4-fach chloriert sein kann !)

## 6 Aufgaben

### 6.1 Eichung des Spektrometers

Da alle Bindungsenergien im Festkörper auf das Fermi-Niveau  $E_F$  bezogen sind, ist dessen genaue experimentelle Bestimmung Voraussetzung für jede Spektrenauswertung. Normalerweise kann die Lage der Fermienergie bei Metallen direkt aus dem Spektrum abgelesen werden. Die geringe Zustandsdichte von Elektronen bei der Fermienergie selbst bei Metallen macht dies jedoch schwierig. Deshalb benutzt man zur Eichung der Fermienergie Metalle, bei denen die Bindungsenergie ihrer intensivsten Rumpfniveaus sehr gut bekannt ist. Diese Metalle sollten möglichst edel sein. Gut dazu geeignet sind das 2p-Niveau von Kupfer ( $E_{\text{Bind}}^{\text{Cu}2p^{3/2}}=952,3\text{eV}$ ), das 3d-Niveau von Silber ( $E_{\text{Bind}}^{\text{Ag}3d^{3/2}}=368,3\text{eV}$ ) und das 4f-Niveau von Gold ( $E_{\text{Bind}}^{\text{Au}4f^{5/2}}=84,0\text{eV}$ ).

- Präparieren Sie nach Anweisung eines dieser Metalle entweder als Aufdampffilm durch Verdampfen des Metalls im Vakuum oder durch Reinigen der Oberfläche einer Metallfolie mit Ionenätzen.
- Messen Sie die so präparierte Probe und bestimmen Sie den Korrekturfaktor  $F_{\text{Kor}}$  zur Berechnung der Bindungsenergie in folgender Formel bei gegebener Photonenenergie ( $h\nu=1253,6\text{eV}$  für Mg-K $\alpha$  und  $h\nu=1486,6\text{eV}$  für Al-K $\alpha$ ) in Elektronenvolt (eV) :

$$(4) \quad E_{\text{Bind}} = E_{\text{Kin}} - h\nu - F_{\text{Kor}}$$

### 6.2 Messung einer unbekannt Probe

Die Zusammensetzung und die chemische Struktur einer unbekannt Probe soll bestimmt werden. Diese Probe wird je nach Aufgabenstellung eine Legierung von Metallen, eine organische Substanz oder ein Halbleiter sein. Folgende allgemeine Arbeitsschritte sind nach Detailabprache dazu auszuführen :

1. Bestimmen Sie zunächst in einem Übersichtsspektrum, welche Elemente die Probe enthält.
2. Messen Sie dann die stärksten Emissionslinien jedes Elementes in einem Detailspektrum aus.
3. Stellen Sie den chemischen Zustand eines jeden Elementes fest (Elementar oder z.B. Oxydiert). Benutzen Sie dazu die bereitgestellten Tabellenwerke.

4. In der Auswertung der Detailspektren ermitteln Sie aus der Fläche unter den jeweiligen Peaks und den dazugehörigen *Atomic Sensitivity Factors* die quantitative Elementzusammensetzung.
5. Gegebenenfalls ist eine Präparation der Probe und ein erneutes Messen nötig. Präparieren Sie die Probe nach vorherigen Anweisungen (z.B. Heizen der Probe im Vakuum oder Reinigen durch Ionenätzen) und wiederholen Sie die vorangegangenen Messungen um Unterschiede festzustellen.

## 7 Literatur

### 7.1 Einführende Literatur

- [Göp94] W.Göpel, Chr.Ziegler: „Struktur der Materie: Grundlagen, Mikroskopie und Spektroskopie“, Teubner-Verlag 1994
- [Hüf95] S.Hüfner: „Photoelectron spectroscopy“, Springer-Verlag 1995
- [XPS92] J.F.Moulder, W.F.Stickle, P.E.Sobol, K.D.Bomben: „Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy“, published by Perkin-Elmer Corp., 1992
- [XPS00] B.V.Crist: „Handbook of Monochromatic XPS Spectra“, John Wiley & Sons, 2000
- [Brig83] D. Briggs, M.P. Seah: „Practical Surface Analysis“, John Wiley & Sons, New York 1983
- [Ert85] G. Ertl, J. Küppers: „Low Energy Electrons and Surface Chemistry“, Verlag Chemie, Weinheim 1985
- [Lev85] K. Levsen: „ESCA“ ,in „Physikalische Methoden in der Chemie“,VCH, Weinheim 1985

### 7.2 Weiterführende Literatur

- [Sie71] K. Siegbahn, C. Nordling et al., Esca Applied to Free Molecules, North-Holland, Amsterdam 1971
- [Car78] M.Cardona, L. Ley: „Photoemission of Solids, 1 u. II“, Topics in Appl.Phys. 26 u. 27, Springer-Verlag, Berlin 1978
- [Car75] T. Carlson: „Photoelectron and Auger Spectroscopy“, Plenum Press, New York 1975
- [Bru77] C.R. Brundle, A.D. Baker: „Electron Spectroscopy: Theory, Techniques and Applications“, Vols. 1, 2 u.3, Academic Press, 1977
- [Gra85] M. Grasserbauer, H.J. Dudek, M.F. Ebel: „Angewandte Oberflächenanalyse mit SIMS, AES und XPS, Springer-Verlag, Berlin 1979
- [Kun79] C. Kunz: „Synchrotron Radiation“, Springer-Verlag, Berlin 1979
- [Sie67] K. Siegbahn, C. Nordling et al.: „ESCA, Atomic, Molecular and Solid State Structure Studies by Means of Electron Spectroscopy“, Almquist & Wiksells, Uppsala 1967
- [Feu78] B. Feuerbacher, B. Fitton, R. Willis: „Photoemission and the Electronic Properties of Surfaces“, J. Wiley & Sons, Chichester 1978

### 7.3 Spezielle Literatur

- [Sea80] M. Seah: Surf. Interface Anal. **2**, 222 (1980).
- [Shi72] D. Shirley: Phys.Rev. B **5**, 4709 (1982).
- [Ton85] S.Tougaard, B. Jorgensen: Surf. Interface Anal. **7**,17 (1985).
- [Don70] S.Doniack, M. Sunjic: J. Phys.C **3**, 285 (1970).