

## A5: Beugung niederenergetischer Elektronen an Oberflächen

### 1. Einführung

In diesem Versuch werden Experimente zur Beugung von niederenergetischen Elektronen mit Energien von ca. 50-500 eV (LEED - Low Energy Electron Diffraction) durchgeführt. Niederenergetische Elektronen werden vom Festkörper schon nach wenigen Netzebenen absorbiert. Beugungsexperimente sind deshalb nur als Reflexionsexperimente möglich und sie zeigen die Struktur der obersten Atomlagen eines Kristalls.

Das erste Elektronenbeugungsexperiment wurde von *Davisson* und *Germer* 1927 ausgeführt, die damit die Wellennatur des Elektrons experimentell nachwiesen.<sup>1</sup> Eine typische Anordnung bei der die Beugungsreflexe direkt auf einem Fluoreszenzschirm sichtbar gemacht werden, zeigt Abb. 1.

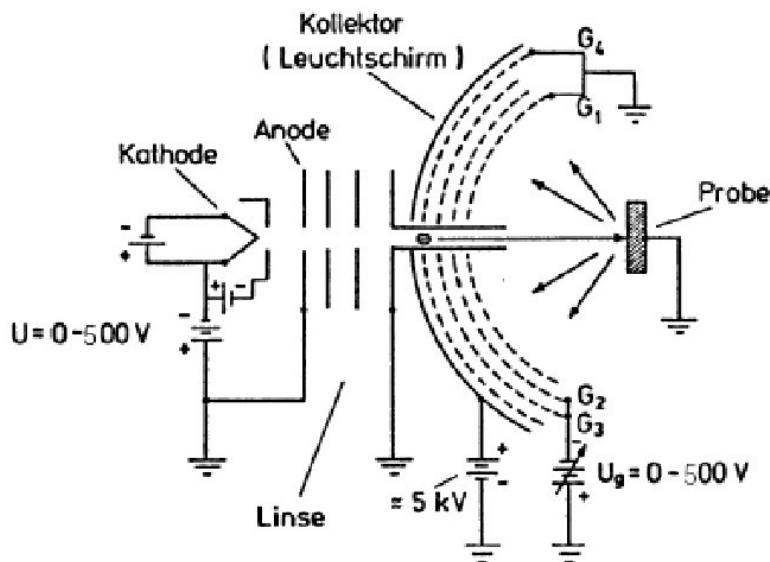


Abb.1: Schematischer Aufbau einer LEED-Optik. Die vorhandene Optik, kann auf der Webseite der Firma Omicron betrachtet werden. [2]

Strukturelle Untersuchungen von Oberflächen mit Hilfe von LEED stellen eine Standardtechnik der Oberflächenphysik dar, die an vielen Vakuumapparaturen zu finden ist.

### 2. Versuchsaufbau

Wegen der Oberflächenempfindlichkeit der Methode müssen LEED-Experimente im Ultrahochvakuum (UHV  $p \sim 10^{-10}$  mbar) durchgeführt werden. Nur unter diesen Bedingungen wird die Oberfläche nicht durch Absorption von Restgasen verändert.<sup>2</sup> Zu diesem Zweck steht eine UHV-Kammer zur Verfügung. Diese ist mit allen typischen Vakuumpumpen<sup>3,4</sup> ausgerüstet; diese sind im Einzelnen:

1. Drehschieberpumpe\*
2. Turbomolekularpumpe
3. Ionengetterpumpe
4. Titan-Sublimationspumpe

Der Druck in der Vakuumkammer wird mit Hilfe eines **Ionisationsmanometers** bestimmt. Zur Reinigung der Oberfläche steht eine Sputterkanone zur Verfügung. Mit diesem Instrument werden Ar-Atome, die über ein spezielles Ventil in die Kammer eingelassen werden, ionisiert und mit bis zu 2000 V beschleunigt. Durch elektrostatische Linsen wird dieser Ionenstrahl auf die Probe fokussiert, wodurch die obersten Atomlagen abgetragen werden. Durch den Ionenbeschuss ergibt sich eine gewisse Rauigkeit der Oberfläche, die durch Tempern\*\* reduziert werden kann, so dass eine saubere und geordnete Oberfläche entsteht.

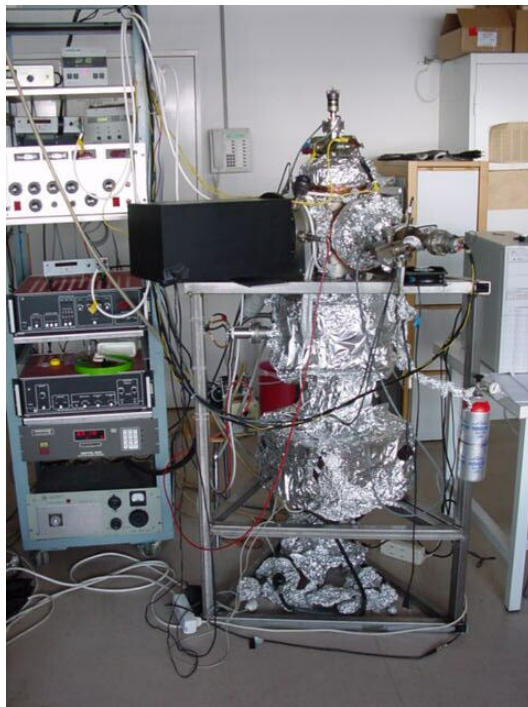


Abb.2 : Foto der im FP benutzten Vakuumkammer.

Diese Prozedur von Sputtern (Ionenätzen) und Tempern ist eine Standardprozedur zur Reinigung der Oberflächen vieler Metalle; eine Übersicht von Reinigungsprozeduren für eine Reihe von Materialien wird von Musket et al. gegeben.<sup>5</sup> Im konkreten Fall wird eine Cu(100) Oberfläche benutzt, die mit 2 keV Ar-Ionen gereinigt und anschließend auf ca. 450 °C hochgeheizt wird.

Zur Aufnahme der Beugungsreflexe steht eine CCD Kamera zur Verfügung, zur Auswertung der Beugungsbilder wird ein PC mit entsprechender Software eingesetzt. Mit Hilfe des PC kann die Elektronik der LEED-Optik angesteuert werden, um z.B. **I(V)-Kurven** aufzunehmen.

---

\* **Die fett gedruckten Begriffe müssen zu Versuchsbeginn beherrscht werden.**

\*\* Als Tempern wird das Anlassen der Oberfläche bezeichnet, d.h. sie wird für eine bestimmte Zeit auf eine erhöhte Temperatur gebracht.

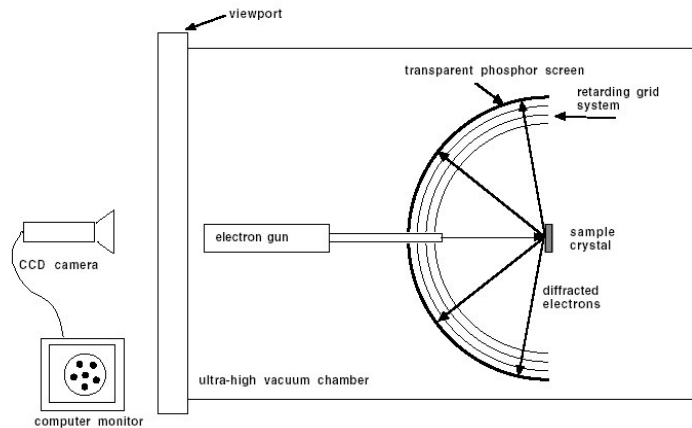


Abb.3: Schematischer Aufbau von LEED, CCD Kamera und Computer.

### 3. Was soll man wissen und lernen:

Für ein besseres Verständnis ist es erforderlich einige Sachverhalte der Beugung an einem Gitter in Erinnerung zu rufen. Unter anderem sollte bekannt sein, wie das Auflösungsvermögen eines Gitterspektrographen und das Intensitätsmaximum von der Zahl der beleuchteten Spalte abhängt.

Am häufigsten wird die *Beugung langsamer Elektronen* (LEED) zur Oberflächenstrukturbestimmung benutzt. Die Oberflächen, der verschiedenen Kristallstrukturen, können auf einer Webseite des Fritz-Haber-Instituts betrachtet werden.[6]

Durch Verwendung von Elektronen mit einer Energie von 20 bis 500 eV liegt die **de Broglie-Wellenlänge** im Bereich atomarer Abstände. Bei senkrechtem Einfall des Elektronenstrahls auf die Oberfläche besteht ein besonders einfacher Zusammenhang zwischen dem beobachteten Beugungsbild und dem **reziproken Netz der Oberfläche**. Das auf einem ebenen Schirm oder Film bei nicht zu kleinem Abstand aufgenommene Abbild des Leuchtschirms ist proportional einer Projektion der **Ewaldkugel**, das Bild gibt also maßstäblich den Querschnitt des **reziproken Raums** wieder.

Im realen Experiment ist der Wellenvektor der einlaufenden Welle nach Betrag und Richtung mit einer Unsicherheit behaftet. Die dadurch entstehenden Änderungen kann man über den Begriff der **Kohärenz**, d.h. der festen Phasenbeziehung beschreiben. Bei der **Chemisorption** von Gasen treten häufig **Überstrukturen** dadurch auf, dass nur ein Teil der möglichen **Adsorptionsplätze** in regelmäßiger Folge besetzt ist.

#### Zur Durchführung des Versuchs:

Um das Ultrahochvakuum zu erzeugen, werden eine **Ionengetter**-, **Turbomolekular**-, **Titansublimations**- und mechanische **Drehschieberpumpe** eingesetzt. Die Oberfläche eines Cu(100) Kristalls wird durch Ionenbeschuss mit Ar und Tempere vorbereitet. Durch Einlassen von Sauerstoff wird eine Überstruktur auf der Cu(100) Oberfläche erzeugt.

**3. Aufgaben** (3.1 -3.6 müssen zur Vorbesprechung durchgeführt sein)

**3.1** Berechnen Sie die Wellenlänge monochromatischer Elektronen, die mit einer Spannung  $V_0$  beschleunigt wurden. Wie groß ist die relativistische Korrektur für  $V_0=500$  eV? Folgerung? Ab welchen Energien muss relativistisch gerechnet werden?

**3.2** Bestimmen Sie die Bedingung für konstruktive Interferenz bei einem Beugungsgitter (Versuch *Optische Spektroskopie* im GP). Zeigen Sie, wie die Formulierung mit Hilfe des reziproken Gitters zum selben Resultat führt.

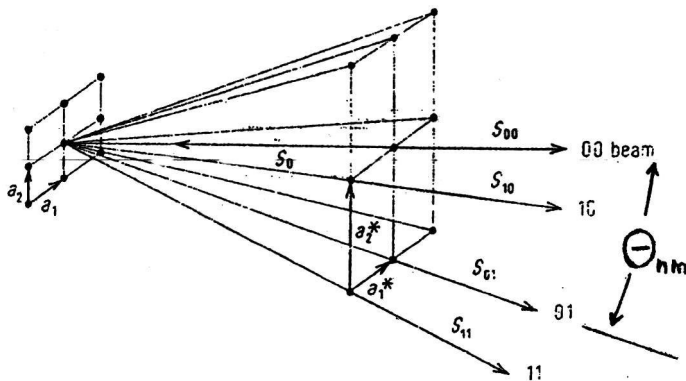


Abb.4 : Skizze zu Aufgabe 3.3 und 3.4.

**3.3** Eine ebene Welle der Wellenlänge  $\lambda$  falle senkrecht auf ein zweidimensionales quadratisches Gitter (Gittervektoren  $\vec{a}_1, \vec{a}_2$  mit  $|\vec{a}_1| = |\vec{a}_2| = a$ , siehe Abb 4.) und werde dort gebeugt. Zeigen Sie, dass für den Winkel  $\Theta_{n,m}$  der gebeugten Strahlen die Beziehung

$$\sin \Theta_{n,m} = \frac{\lambda}{a} (n^2 + m^2)^{1/2} \quad (n, m \text{ ganze Zahlen})$$
 gilt. Kommentieren Sie die Bedeutung von  $n$  und  $m$ . (Hinweis: Argumentieren Sie mit dem Richtungssinus des in Richtung  $\Theta_{n,m}$  gebeugten Strahls).

**3.4** Anwendung von LEED:  $S_0$  sei die Richtung der einfallenden Elektronenwelle (siehe Abb.4) mit der Wellenlänge  $\lambda(\text{\AA}) = \frac{12.26}{\sqrt{V(\text{eV})}}$ , wobei  $V_0$  die Energie der

einfallenden Elektronen ist. Rechnen Sie die minimale Energie  $V_0$  in eV für ein Gitter mit  $a=2.55$  \AA (entspricht Cu-Cu-Abstand in einem Cu-Kristall) aus, sodass : a) die Reflexe erster Ordnung  $m=n=1$  und  $m=0, n=1$  und b) zweiter Ordnung  $m=n=2$  gerade noch auf einem kugelförmigen Schirm mit einem Öffnungswinkel von  $52^\circ$  zu sehen sind. Skizzieren Sie die Beugungsbilder.

**3.5** Skizzieren Sie für die Cu(100)-Oberfläche eine  $(\sqrt{2} \times \sqrt{2})R45^\circ$ -Überstruktur im Realraum und im reziproken Raum. (Hinweis: Hierzu ist die Kenntnis der Woods-Notation notwendig). Die Rechenregeln sind explizit im Kapitel 9 (S. 215 ff) von Ertl-Küppers angegeben und sollen für die obige Rekonstruktion benutzt werden.[3] Skizzieren Sie das erwartete Beugungsbild.

**3.6** Diskutieren Sie den Begriff **kinematische Näherung** und zeigen Sie, wie im Rahmen dieser Näherung, die senkrechte Gitterkonstante aus der **I(V)-Kurve** des **(0,0)-Strahls** bestimmt werden kann.

**3.7** Präparation einer sauberen Cu(100)-Oberfläche durch Zyklen von Beschuss mit Argon-Ionen und Tempern. LEED-Aufnahmen dieser (sauberen) Oberflächen im Energieintervall 50-150 eV. Bestimmung der Gitterkonstante in der Ebene mittels der Resultate von 3.1 –3.3.

**3.8** Aufnahme der **I(V)-Kurve** des **(0,0)-Strahls** im Energiebereich 200-600 eV. Bestimmung des Netzebenenabstands. Hinweis: Auf S. 231 von Ertl-Küppers ist eine I(V)-Kurve für Ni(100) gezeigt, diese ist nützlich um die Beugungsordnungen zu bestimmen.

**3.9** Durch ein spezielles Dosierventil wird  $O_2$  in die Kammer eingelassen. Bei korrekter Dosierung wird eine Überstruktur sichtbar. Aufnahme von LEED-Bildern im Intervall 50-150 eV. Durch Vergleich der LEED-Bilder von 3.7 sollen die Reflexe der Überstruktur identifiziert werden. Weiterhin soll die Überstruktur mit Hilfe der Wood-Notation charakterisiert werden. Inwieweit ist das Beugungsbild mit dem Resultat von 3.5 verträglich?

#### 4. Literatur:

[1] [www.nobel.se/physics/laureates/1937/davisson-lecture.pdf](http://www.nobel.se/physics/laureates/1937/davisson-lecture.pdf)

[2] [www.omicron.de/pic/specta.jpg](http://www.omicron.de/pic/specta.jpg)

[3] M. Henzler und W. Göpel, Oberflächenphysik des Festkörpers Kap.2, Teubner Studienbücher Physik, Stuttgart. 1991

Low Energy Electrons and Surface Chemistry,  
G. Ertl, J. Küppers, Kapitel 9, VCH, Weinheim, 1985.

[4] <http://www.cem.msu.edu/%7Ecem924sg/Topic02.pdf>

[5] R.G. Musket et al. Applications of Surface Science 10, 143 (1982)

[6] [www.fhi-berlin.mpg.de/~rammer/surfexp\\_prod/SXinput.html](http://www.fhi-berlin.mpg.de/~rammer/surfexp_prod/SXinput.html)