

# Transmissions-Elektronen-Mikroskopie

Adrian Messow, Sven Mehrkens

Tutor: ???

Durchführung: 14.12.2017

Abgabe: ???

## 1 Einführung

In diesem Versuch werden die Grundlagen des Transmissionselektronenmikroskops (TEM) vermittelt. Dabei werden nach einer grundlegenden Justierung die Beugungsbilder im Hellfeld und Dunkelfeld an einer GaAs-Probe aufgenommen und indiziert. Durch Aufnahmen von InGaAs-Quantentrögen wird anschließend einerseits über die Intensitätsverteilung und andererseits über die Gitterkonstanten die Indiumkonzentration bestimmt.

## 2 Theoretische Grundlagen

Transmissionselektronenmikroskope erreichen eine Auflösung die im Sub-Å-Bereich liegt. Dies liegt an der Verwendung von Elektronen zur Bildgebung, anstatt von Photonen in herkömmlichen Lichtmikroskopen. Dabei werden Elektronen aus einem Filament heraus beschleunigt und über Linsensysteme auf die Probenoberfläche fokussiert. Die transmittierten Elektronen werden über geeignete Beobachtungssysteme sichtbar gemacht. Das Auflösungsvermögen wird durch das Raleigh-Kriterium beschrieben und kann bei kleinen Winkelabweichungen von  $\alpha < 1^\circ$  beschrieben werden durch  $\delta > 60\lambda$ . Für eine typische Beschleunigungsspannung von 100 kV ergibt sich zum Beispiel eine Auflösung von 0,2 nm. Dabei wird die Wellenlänge des Elektrons durch die *de Broglie Wellenlänge* für relativistische Teilchen beschrieben:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV\left(\frac{1+eV}{2m_0c^2}\right)}} \quad (1)$$

Mit  $h$  dem planck'schen Wirkungsquantum,  $m_0$  der Ruhemasse des Elektrons,  $c$  der Lichtgeschwindigkeit und  $eV$  der Energie des Elektrons in Elektronenvolt.

Zwei Bildgebungsarten sind möglich. Das erste ist das Beugungsbild, hier wird das reziproke Gitter des Kristalls abgebildet. Das zweite ist das Realbild (Abb. 1).

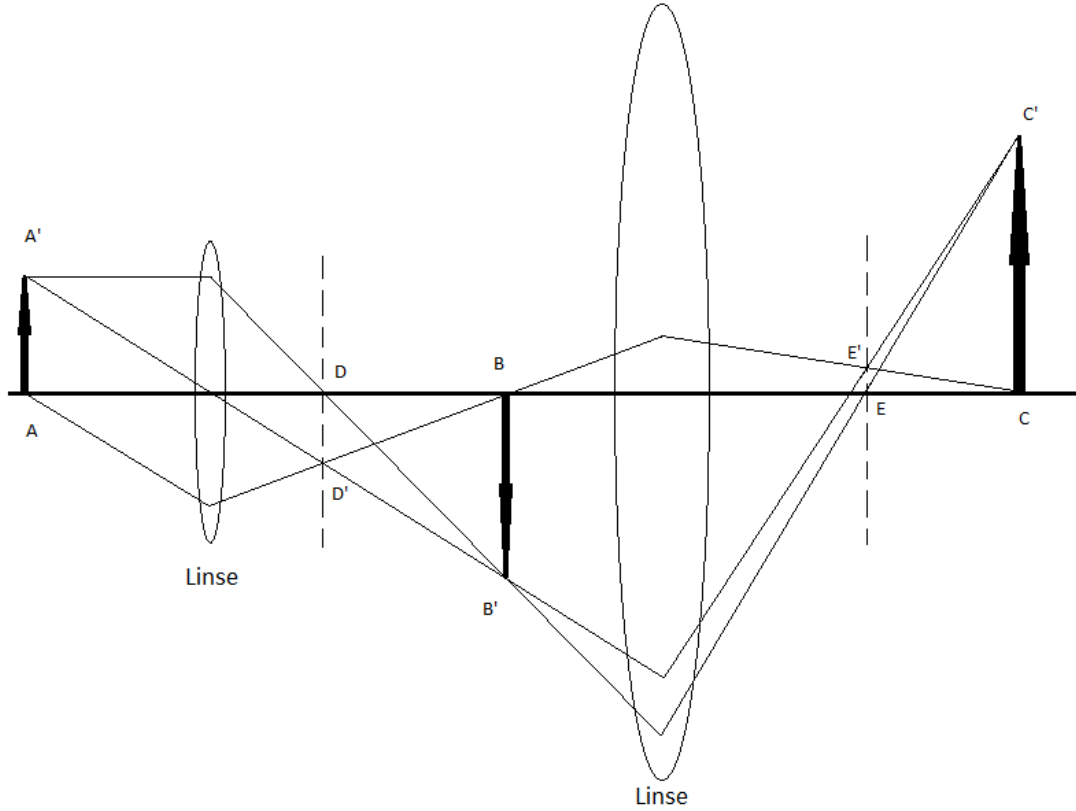


Abbildung 1: Schematische und vereinfachte Darstellung des Strahlenganges zur Entstehung der zwei Bildarten. Realbilder bei BB' und CC'. Beugungsbilder bei DD' und EE'.

Werden Elektronen an den Atomen im Kristall gestreut, so ergibt sich eine vom Steuwinkel abhängige Intensitätsverteilung. Die Elektronen werden nach dem Bragg-Gesetz gestreut. Da die Winkel durch die kurze Wellenlänge der Elektronen jedoch sehr klein sind, kann der Bragg-Winkel genähert werden zu:

$$2d\theta = n\lambda \quad (2)$$

Mit  $\lambda$  der Wellenlänge der Elektronen,  $d$  dem Abstand der Atome im Gitter und  $\theta$  dem Winkel des Elektronenstrahls zur Atomebene. Somit werden für jeden Gitterbaustein bestimmte Reflexe erwartet. Jedoch entstehen nicht von jedem Gitterbaustein Reflexe. Über den Strukturfaktor können nun die verbotenen und erlaubten Reflexe, berechnet werden.

$$F_{hkl} = \sum_{j=1}^n f_j(\theta) \exp[-2\pi i(hu_j + kv_j + lw_j)] \quad (3)$$

Mit  $h, k, l$  den Millerschen Indizes,  $f_j(\theta)$  dem Streufaktor und  $j = 1, 2, 3, \dots, n$  dem  $j$ ten Atom in der Einheitszelle am Ort  $(u, v, w)$ .

Das Ergebnis sind Beugungsbilder, die von der Kristallstruktur abhängig sind. Besteht eine Probe aus mehreren Kristallen mit unterschiedlicher Orientierung zueinander, so überlagern

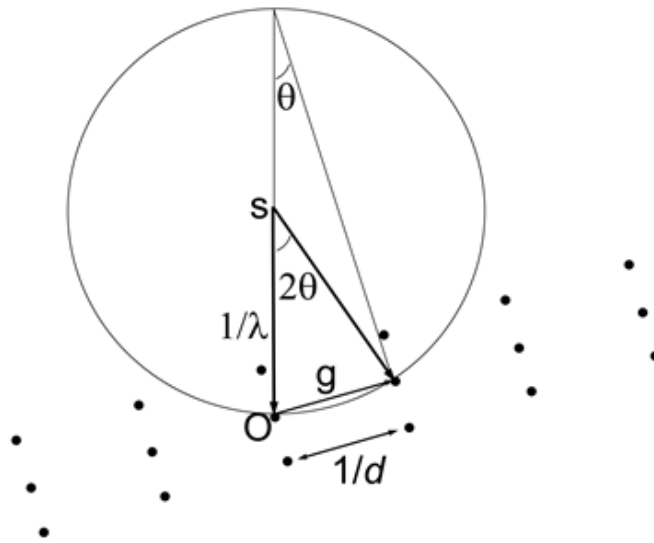


Abbildung 2: Konstruktion der Ewaldkugel im reziproken Kristallgitter.

sich die jeweiligen Beugungsbilder. Eine anschauliche Verdeutlichung des Bragg-Gesetzes ist die Ewald-Kugel (Abb. 2). Dabei wird in das reziproke Gitter des Kristalls der einfallende Elektronenstrahl mit der Länge  $1/\lambda$  auf einen gewählten Ursprungsreflex gezeichnet. Die Länge des Elektronenstrahls gibt den Radius eines Kreises, dessen Mittelpunkt der Anfang des Elektronenstrahls definiert. Alle Reflexe, die nun auf dem Kreis liegen, sind im Beugungsbild erkennbar. Da die Intensitätsbreite des Bragg-Winkels von der Dicke der Probe mit  $1/t$  abhängt, weicht das reziproke Gitter auf und es sind keine Punkte mehr, sondern Linien. Somit sind auch Reflexe sichtbar, wenn die Ewaldkugel knapp die reziproken Gitterpunkte verfehlt.

### 3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

#### 4 Auswertung

Es wurde eine GaAs Probe untersucht, die Quantentröge aus InGaAs enthält. Auf einem Bereich mit mehreren solchen Quantentrögen wurde das Beugungsbild in Abb. ?? aufgenommen, während die Probe in Zonenachse  $[100]$  orientiert war.

Die Zonenachse  $[100]$  ist dadurch zu erkennen, dass die Intensitäten der Reflexe symmetrisch um den Punkt  $(000)$  verteilt sind. Wird die Probe verkippt, bilden sich Lauekreise mit Zentren abseits des Punktes  $(000)$ , sodass der Punkt  $(000)$  immer auf dem Rand des Kreises liegt. Da GaAs ein Kubisches Gitter mit zwei Atomsorten bildet, haben alle Punkte mit ungeraden Laue-Indizes einen Strukturfaktor von 0. Dementsprechend sind die entsprechenden Reflexe auf dem Beugungsbild auch nicht zu erkennen. Im Folgenden wurden mehrere Beugungsbilder mit unterschiedlichen Lauekreiszentren aufgenommen.

In den Abb. 4a und 4b sind diese Beugungsbilder zu sehen. Im Lauekreis um das je-

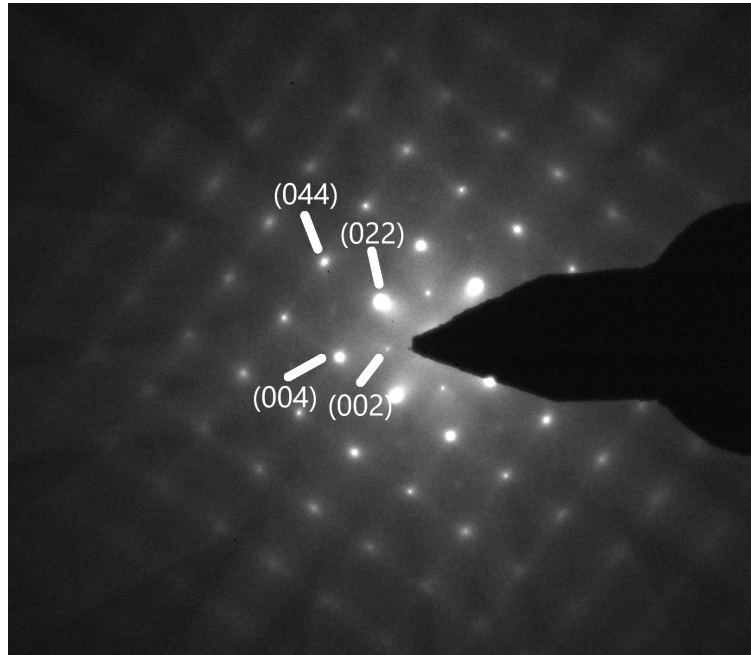


Abbildung 3: Beugungsbild auf InGaAs in Zonenache [100]

weilige Zentrum herum haben diejenigen Reflexe eine starke Intensität, die die Bragg-Reflexionsbedingung erfüllen. Eine Verschiebung des Lauekreiszentrums entsteht zudem auf unterschiedlichen Probenstellen durch geringe Unebenheiten oder auch durch anders ausgerichtete Kristallebenen erfolgen.

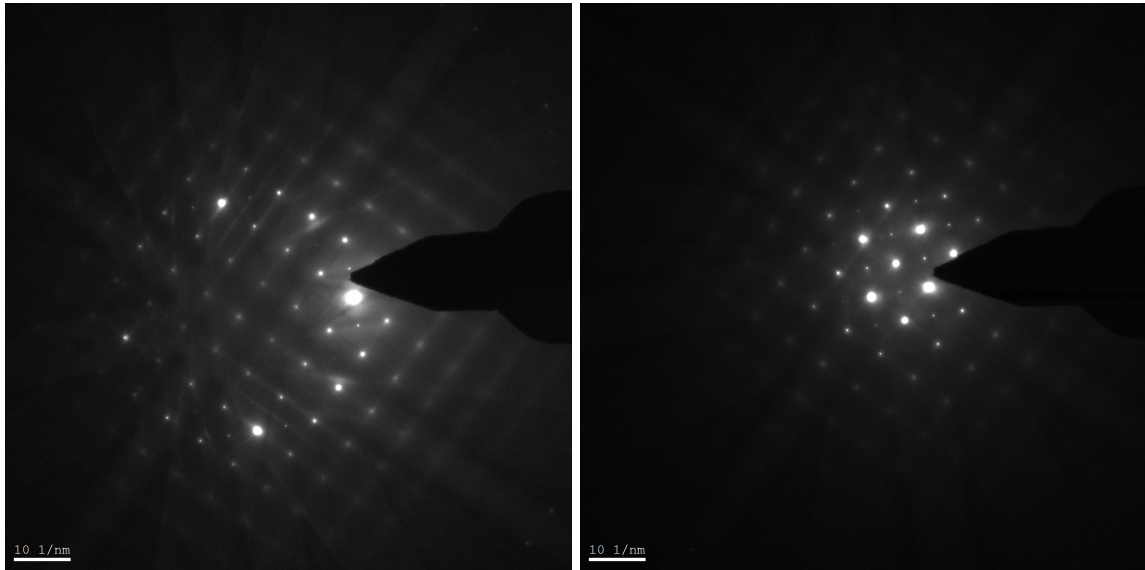
Damit die (004) Netzebenen in Bragg-Reflexionsstellung sind, muss der (004) Reflex im Beugungsbild auf dem Lauekreis liegen. Dies ist im einfachsten Fall beim Lauekreiszentrum (002) gegeben. Zu sehen ist dieser Fall in Abb. ?? zu sehen.

Zudem liegt der Reflex (022) in diesem Fall ebenfalls auf dem Lauekreis. Indem mit einer kleinen Blende alle Reflexe bis auf einen ausgeblendet werden, konnten im Folgenden Dunkelfeldaufnahmen der Probe gemacht werden.

Zum Vergleich ist in Abb. 6a eine Hellfeldaufnahme der Probenstelle zu sehen. In den Abb. 6b und 6c sind zwei Dunkelfeldaufnahmen zu sehen, die mit unterschiedlichen Reflexen erstellt wurden.

In der Hellfeldaufnahme sind die InGaAs Quantentröge nicht sehr gut von dem umgebenen GaAs zu unterscheiden. Hierbei bieten die Dunkelfeldaufnahmen Vorteile. Da InGaAs eine andere Gitterkonstante besitzt als GaAs, sind die Reflexe nicht am gleichen Ort im Beugungsbild, sodass die InGaAs Schichten deutlich dunkler im Bild zu sehen sind. Dieser Effekt ist sowohl beim Reflex (022) als auch beim Reflex (004) zu erkennen.

Es sind außerdem Bereiche auf den Dunkelfeldaufnahmen zu sehen, die ebenfalls dunkel erscheinen und keine Einzelheiten mehr erkennen lassen. Dies könnten Bereiche sein, in denen die Probe eine unterschiedliche Kristallorientierung besitzen und dadurch der jeweilige Reflex verschoben oder schwächer ausgeprägt ist.



(a) Beugungsbild mit Lauekreiszentrum (008)      (b) Beugungsbild mit Lauekreiszentrum (022)

Abbildung 4: Beugungsbilder bei unterschiedlichen Probendrehung

## 5 Zusammenfassung

### Anhang

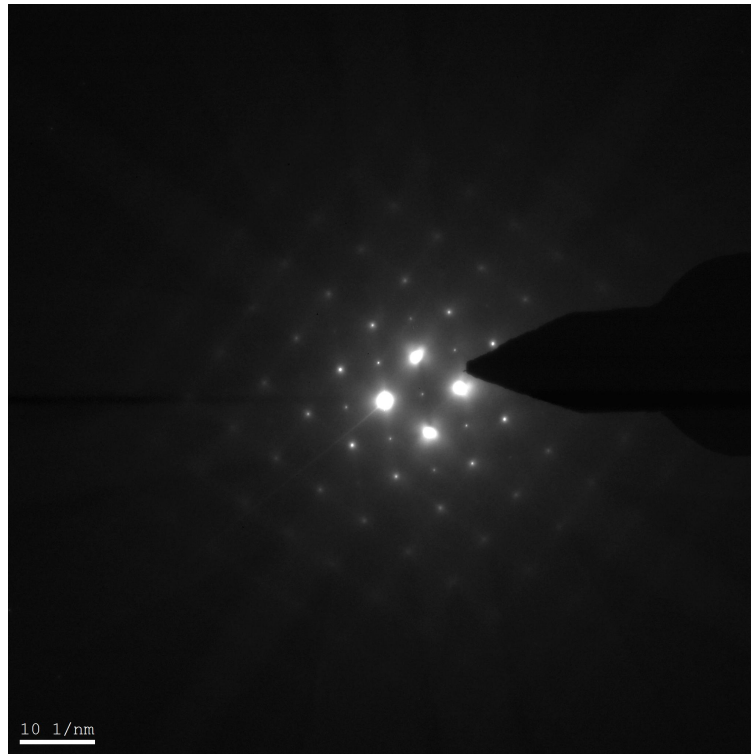
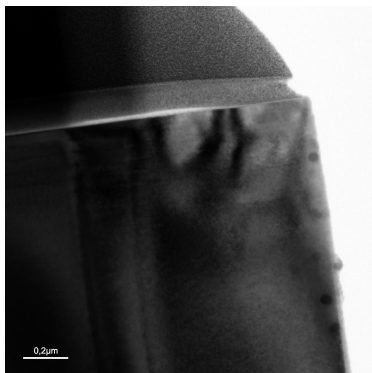
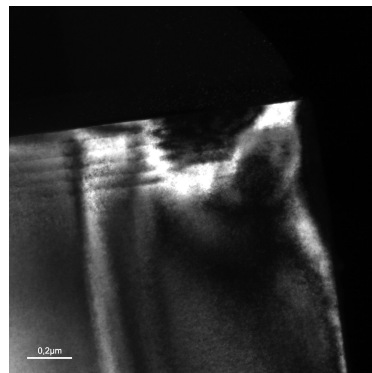


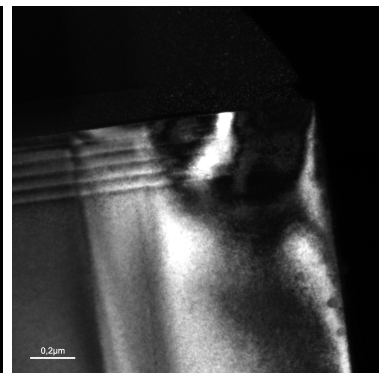
Abbildung 5: Beugungsbild mit Lauekreiszentrum (002)



(a) Hellfeldaufnahme



(b) Dunkelfeldaufnahme  
Reflex (004)



mit (c) Dunkelfeldaufnahme mit  
Reflex (022)

Abbildung 6: Aufnahmen