



physikalisches Institut
Fortgeschrittenenpraktikum

Prak.: P2 Semester: SS18 Wochentag: Mi Gruppennr.: 42

Name: Bernhardt Vorname: Felix

Name: Vosteen Vorname: Lars

Emailadresse(n): Felix.Bernhardt@physik.uni-giessen.de, Lars.B.Vosteen@physik.uni-giessen.de

Versuch: Plasmakristalle (P2-21) Fehlerrech.: Ja

Betreuer: Dr. Michael Kretschmer Durchgeführt am: 06.07.'18

Wird vom Betreuer ausgefüllt.

Abgabe am: _____

Rückgabe am: _____ Note: _____

Begründung:

Inhaltsverzeichnis

0. Zielsetzung	1
0.1. Zielsetzung	1
1. Theorie	2
1.1. Plasma	2
1.2. Plasmakristall	2
1.3. Struktur des Kristalls	2
2. Auswertung	4
2.1. Abbildungsmaßstab des Kamerasystems	4
2.2. Herstellung des Kristalls	4
2.3. Vermessung des Kristalls	4
2.3.1. Gitterabstand	4
2.3.2. Ausmaße	4
2.3.3. Teilchenanzahl	5
2.4. Laserscan	6
2.5. Bestimmung des vorliegenden Gittertypes	7
2.6. Grenzbereiche	8
2.6.1. Änderung des Druckes	8
2.6.2. Änderung der Spannung	8
3. Fazit	13
Anhang	14
A. Graphen	14
A.1. BCC-Gitter	14
A.2. FCC-Gitter	14
A.3. HCP-Gitter	15
B. Messwerte	16
Literaturverzeichnis	17

Abbildungsverzeichnis

2.1. Plasmakristall	5
2.2. Bildausschnitt des Laserscans	6
2.3. Ergebnis des Laserscans	7

2.4. Histogramm der Teilchenabstände	8
2.5. Paarkorrelationsfunktion des Kristalls	9
2.6. Bond-Order-Parameter; 8 Nachbarn	9
2.7. Bond-Order-Parameter; 12 Nachbarn	10
2.8. Partikelwolke bei 32 Pa	10
2.9. Partikelwolke bei 24 Pa	11
2.10. Partikelwolke bei 0,15 V	11
2.11. Partikelwolke bei 1,5 V	12
A.1. BCC: xy-Ebene	14
A.2. BCC: xz-Ebene	14
A.3. BCC: yz-Ebene	14
A.4. BCC: Teilchenabstände	14
A.5. BCC: Paarkorrelationsfunktion	14
A.6. FCC: xy-Ebene	14
A.7. FCC: xz-Ebene	14
A.8. FCC: yz-Ebene	14
A.9. FCC: Teilchenabstände	15
A.10. FCC: Paarkorrelationsfunktion	15
A.11. HCP: xy-Ebene	15
A.12. HCP: xz-Ebene	15
A.13. HCP: yz-Ebene	15
A.14. HCP: Teilchenabstände	15
A.15. HCP: Paarkorrelationsfunktion	15

Tabellenverzeichnis

2.1. Bestimmung des Abbildungsmaßstabes	4
2.2. Bond-Order-Parameter der idealen Strukturen	7
B.1. Messwerte zur Anzahlbestimmung	16
B.2. Anzahlbestimmung	16

0. Zielsetzung

0.1. Zielsetzung

In diesem Versuch gilt es, einen Plaskaristall zu erzeugen, zu beobachten und verschiedene Eigenschaften zu bestimmen. Dafür wird mit Argon in einer Niederdruckkammer ein Plasma gezündet. In dieses werden eine Vielzahl Plastikpartikel gegeben, die sich negativ und laden bei geeigneten Umständen zu einem Kristall anordnen. Mit Hilfe eines Lasers kann dieser ebenenweise mit einer Digitalkamera beobachtet werden.

1. Theorie

1.1. Plasma

Plasma wird oft als der vierte Aggregatzustand bezeichnet. Die Atome liegen hierbei als Ionen vor, die Elektronen und Ionen können sich frei bewegen. Je nach Eigenschaften der Plasmateilchen wird dieses in verschiedene Kategorien eingeteilt:

- **relativistisches Plasma** liegt vor, wenn die kinetische Energie der Elektronen $\approx 30\%$ der Lichtgeschwindigkeit beträgt.
- Ein **quantenmechanisches Plasma** liegt vor, wenn die De-Broglie-Wellenlänge der Plasmateilchen größer als der Abstand zwischen den Teilchen ist.
- Bei einem **idealen Plasma** ist die Coulomb-Wechselwirkungsenergie zwischen den Teilchen schwächer als die thermische Energie der Teilchen.
- Ist der Ionisationsgrad $\frac{n_i}{n_i+n_g} \ll 1$, so spricht man von einem **Niedertemperaturplasma**. Hierbei sind n_i die Dichte der ionisierten- und n_g die Dichte der Neutralgasatome.

Für diesen Versuch wird ein nicht-relativistisches, klassisches, stark gekoppeltes Niedertemperaturplasma benötigt.

1.2. Plasmakristall

Die Plasmateilchen sind frei beweglich, sie können daher keine Kristallstruktur bilden. Um diese zu erzeugen wird ein sogenanntes **komplexes Plasma** benötigt: Zum Plasma werden kleine, feste Kügelchen (Radius $\approx 1\mu m$) zugesetzt. Die Partikel laden sich daraufhin durch Stöße mit den freien Elektronen des Plasmas auf. Durch die Coulomb-Wechselwirkung zwischen diesen stark geladenen Kügelchen können diese unter richtigen Randbedingungen in einen geordneten Zustand gebracht werden und der Plasmakristall entsteht. Durch ein elektrisches Feld kann der Kristall in Schwebe gehalten, und mit einem Laser beobachtet werden,

Zusätzlich wirken aufgrund des Neutralgases Reibungskräfte auf den Kristall. Zudem kann Thermospherese auftreten: Dabei werden die Teilchen entlang des Temperaturgradienten im Plasma bewegt.

1.3. Struktur des Kristalls

Ein Kristall zeichnet sich durch Fernordnung aus, d.h. die Abstände der Atome (in unserem Fall der Plastik Kügelchen) sind periodisch. Die Paarkorrelationsfunktion $g(\mathbf{r})$ ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit einer Fernordnung:

$$g(\mathbf{r}) = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{i \neq j}^N \delta(\mathbf{r} - (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)) \right\rangle$$

Die Funktion gibt also den Erwartungswert an, dass sich im Abstand r von einem Teilchen i ein anderes Teilchen j befindet. Liegt Fernordnung vor und zeichnet man die Funktion g gegen r auf, so sind daher periodische Peaks zu finden. Die Struktur muss nicht im gesamten Kristall dieselbe sein: Es können sich auch Domänen bilden, d.h. das verschiedene „Abschnitte“ des Kristalls unterschiedliche Strukturen besitzen können.

Im Verlauf der Auswertung wird die Struktur mithilfe der Local-Order-Analyse durchgeführt. Hierfür werden Bond-Order-Parameter (numerisch) berechnet:

$$q_l(\mathbf{r}_i) = \sqrt{\frac{4\pi}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |q_{lm}(\mathbf{r}_i)|^2}$$

Mit

$$q_{lm}(\mathbf{r}_i) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Y_{lm}(\Theta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j), \Phi(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j))$$

Mithilfe dieser Funktionen können verschiedene Domänenstrukturen bestimmt werden.

2. Auswertung

2.1. Abbildungsmaßstab des Kamerasystems

Bevor das Plasma gezündet wird, muss der Abbildungsmaßstab der Messvorrichtung bestimmt werden. Hierzu vermessen wir den Abstand der unteren Elektrode zum Rand der Kammer bei verschiedenen Kamerapositionen und lassen uns mithilfe des Programmes „uEyeCockpit“ die Länge dieser Distanz in Pixeln ausgeben. Damit erhalten wir:

Kameraabstand/Zoll	Distanz/Pixel
0.8	34
0.0	914

Tabelle 2.1.: Bestimmung des Abbildungsmaßstabes

Der Abbildungsmaßstab A ergibt sich dann zu:

$$A = \frac{(0.8 - 0.0) \text{ Zoll} * 2,54 * 10^4 \frac{\text{cm}}{\text{Zoll}}}{(914 - 34) \text{ Pixel}} = 23,09 \frac{\mu\text{m}}{\text{Pixel}}$$

2.2. Herstellung des Kristalls

Nun leiten wir Argon-Gas in die Kammer; Dabei wird der Druck auf 40 Pa gesetzt. Ab einer RF-Spannung von 1,15 V zündet das Plasma. Die Spannung wird nun auf 0,15 V reduziert, wobei der Plasmazustand des Gases erhalten bleibt. Anschließend werden die Plastikpartikel aus Melamin-Formaldehyd mit einem Dispenser in die Kammer gebracht. Die Partikel ordnen sich nach einer Zeit von 1-2 min an und bleiben (in guter Näherung) in Position; Der Plasmakristall wurde hergestellt. An sämtlichen Rändern des Kristalls bewegen sich die Partikel recht stark, nur im inneren der Struktur sind die Teilchen fix. Im unteren Bereich des Kristalls haben sich die Plastikkügelchen „geklumpt“ (große Punkte im Bild); Durch das erhöhte Gewicht werden sie nach unten gezogen (siehe Abbildung 2.1).

2.3. Vermessung des Kristalls

Die Tabellen (B.1 und B.2) der genauen Messwerte befinden sich im Anhang auf Seite 16. Nachfolgend stehen gerundete Werte; gerechnet wurde mit möglichst genauen.

2.3.1. Gitterabstand

Der ermessene gemittelte horizontale Gitterabstand beträgt $\sim 8 \text{ Pixel} \approx 0,19 \text{ mm}$. In vertikaler Ausrichtung maßen wir $\sim 6 \text{ Pixel} \approx 0,15 \text{ mm}$.

2.3.2. Ausmaße

Außermessen ergab eine Breite von $\sim 1410 \text{ Pixel} \approx 32,4 \text{ mm}$ und eine Höhe von $\sim 120 \text{ Pixel} \approx 2,8 \text{ mm}$ des Kristalls. Nebeneinander existieren also ~ 170 Teilchen: übereinander ~ 20 .



Abbildung 2.1.: Plasmakristall

2.3.3. Teilchenanzahl

Aus obenstehenden Angaben lässt sich unter der Prämisse der rotationssymmetrischen Gleichverteilung und Zylinderartigkeit des Kristalls, die Anzahl der Teilchen in der Wolke bestimmen:

$$\left(\frac{\text{horizontale Anzahl}}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot \text{vertikale Anzahl} \approx 425\,000$$

Mit den folgenden Werten ([1],[2]) sollen weitere Abschätzungen gemacht werden.

$$\begin{aligned} \text{Partikelradius: } a &= 1\,\mu\text{m} \\ \text{Iontemperatur: } k_B T_i &= 0,03\,\text{eV} \\ \text{Elektronentemperatur: } k_B T_e &= 3\,\text{eV} \end{aligned}$$

$$\text{Dichte von Melamin-Formaldehyd: } \rho = 1510\,\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{kinetische Partikeltemperatur: } T_d = 300\,\text{K}$$

$$\text{Materialkonstante B: } B = 0,73$$

$$\text{Dichte der Ionen: } n_i = 10^9\,\frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$\text{Masse Argon: } M_{Ar} = 39,95\,u$$

$$F_n = F_i = F_{th} = 0$$

$$\text{Erdbeschleunigung: } g = 9,81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Elektronenladung: } e = 1,602 \cdot 10^{-19}\,\text{C}$$

$$\text{Boltzmann-Konstante: } k_B = 1,3807 \cdot 10^{-23}\,\frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$\text{Dielektrizitätskonstante: } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}\,\frac{\text{As}}{\text{Vm}}$$

$$\text{Elektronenmasse: } m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}\,\text{C}$$

(2.1)

Die Ladung der Partikel Q erhalten wir dann zu:

$$Q = Z \cdot e = B \frac{4\pi\epsilon_0 a k_B T_e}{e} \ln\left(\sqrt{\frac{T_e m_e}{T_i M_{Ar}}}\right) = -4,97 \cdot 10^3 e = -7,96 \cdot 10^{-16} C$$

Um diese Partikel in Schwebe zu halten wird folgende Feldstärke benötigt (Die Plastikkugeln werden als perfekte Kugeln angenähert):

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{M \cdot g}{Q} = \frac{\rho \frac{4}{3} \pi a^3 \cdot g}{Q} = -77,92 \frac{V}{m}$$

Die Debye-Wellenlänge ergibt sich zu:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_i}{e^2 n_i}} = 40,7 \mu m$$

Um den Coulomb-Kopplungsparameter Γ zu bestimmen benötigen wir zuerst den Partikelabstand¹ Δ :

$$\Delta = \frac{\tilde{x} + \tilde{y}}{2} \approx 170 \mu m$$

$$\Rightarrow \Gamma = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0 \Delta k_B T_d} \approx 8093$$

Der effektive Coulomb-Kopplungsparameter berücksichtigt zusätzlich die Debye Wellenlänge und den Partikelabstand:

$$\Gamma_{eff} = \Gamma \cdot \exp\left(-\frac{\Delta}{\lambda_D}\right) \approx 124$$

Wir haben also mit ein stark gekoppeltes Plasma vorliegen ($\Gamma > 1$).

2.4. Laserscan



Abbildung 2.2.: Bildausschnitt des Laserscans

Nach Wahl eines geeigneten Bildausschnitts (siehe Abbildung 2.2) wird ein Laserscan durchgeführt. Die Ergebnisse des Scans sind in zwei der resultierenden drei Dimensionen in Abb. 2.3 dargestellt. Die Abstände der Teilchen haben wir ebenfalls bestimmt, das zugehörige Histogramm ist in Abbildung 2.4 zu finden.

Die Verteilung der Abstände ist recht scharf auf einen Bereich zwischen 0,15-0,18mm begrenzt. Für einen idealen Kristall sollten sich δ -Peaks ergeben. Die Paarkorrelationsfunktion g kann in Abbildung 2.5 gesehen werden: Die Fernordnung der Struktur ist dort deutlich zu erkennen.

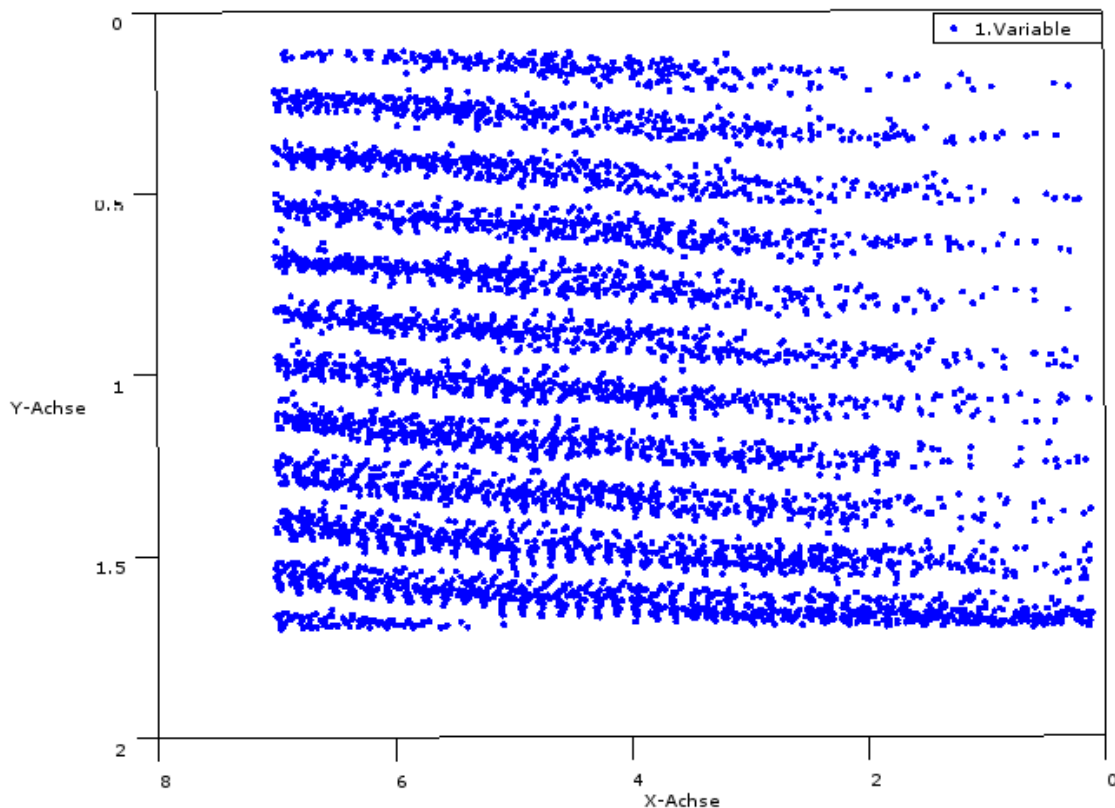


Abbildung 2.3.: Ergebnis des Laserscans

	BCC	FCC	HCP
q4	0.509	0.191	0.097
q6	0.629	0.575	0.485

Tabelle 2.2.: Bond-Order-Parameter der idealen Strukturen

2.5. Bestimmung des vorliegenden Gittertypes

Wir betrachten hauptsächlich kubisch - flächenzentrierte (FCC), kubisch-raumzentrierte (BCC) und hexagonale (HCP) Gitter. Für alle diese Gittertypen wird nun die Paarkorrelationsfunktion g , sowie der Teilchenabstand berechnet. Sämtliche Abbildungen befinden sich auf Seiten 14-15 im Anhang.

Zur Bestimmung welcher Kristallstruktur vorliegt, werden die Bond-Order-Parameter q_4 und q_6 der idealen Strukturen berechnet und mit den experimentell erhaltenen verglichen. Die berechneten, idealen Parameter sind in Tabelle 2.2 gegeben.

Die Bond-Order Parameter unseres Kristalls werden nun bezüglich ihrer Häufigkeit geplottet: Rot steht für häufig, blau für selten auftretende Werte. Die Abbildungen können in 2.6 und 2.7 gefunden werden. Es werden hierfür einmal die 8- und einmal die 12-nächsten Nachbarn betrachtet.

In Abbildung 2.6 lässt sich ein Maximum bei etwa $[q_4=0,25; q_6=0,55]$ erkennen. Dieser Bereich lässt sich keiner der gegebenen Strukturen zuordnen. Dafür wird das Ergebniss beim betrachten der 12-nächsten Nachbarn in Abbildung 2.7 deutlicher: Es lassen sich eindeutig Bereiche der HCP-Struktur zuordnen, außerdem ist eine kleine Domäne der FCC-Struktur zu finden (vgl. mit Tabelle 2.2). BCC-Domänen liegen hingegen nicht vor.

¹Diesen mitteln wir aus horizontalem und vertikalen Abständen um eine Richtungsabhängigkeit des Parameters zu vermeiden.

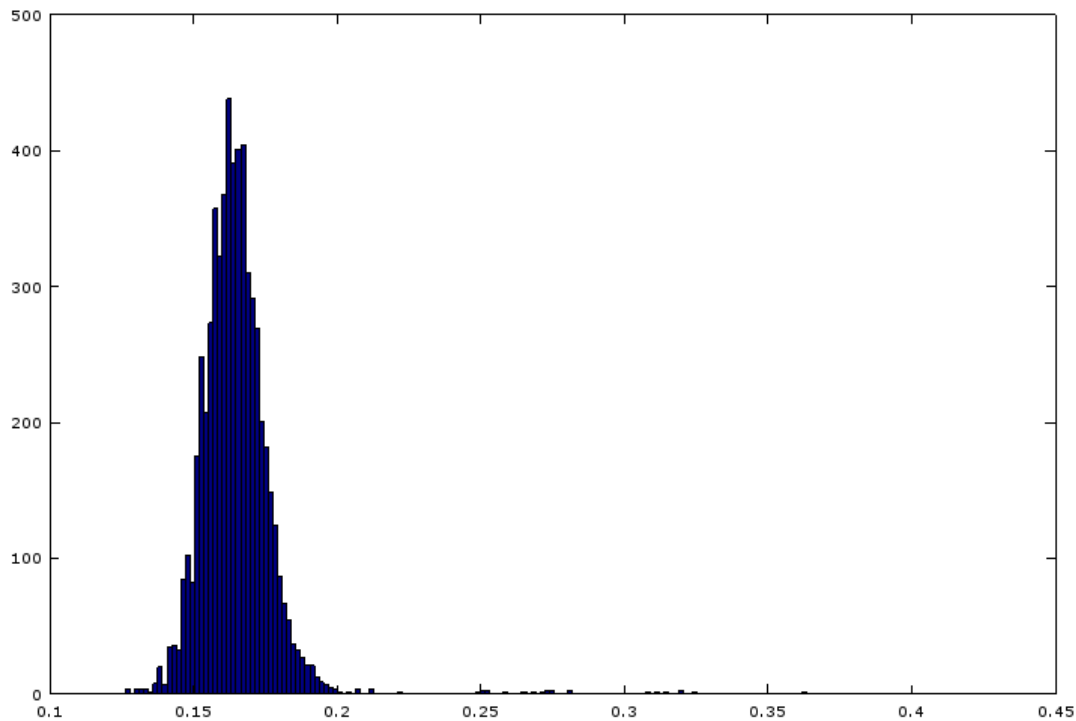


Abbildung 2.4.: Histogramm der Teilchenabstände

2.6. Grenzbereiche

Abschließend soll die Struktur der Plastikteilchen bei Änderungen der Spannung und des Druckes untersucht werden. Als Ausgangsstruktur wird ein Druck von 40 Pa und eine RF-Spannung von 0,15 eV verwendet (siehe als Vergleich Bild 2.1).

2.6.1. Änderung des Druckes

Wir verringern nun den Druck von 40 Pa auf 14 Pa. Ab 32 Pa beginnen die Partikel des Kristalls in den unteren Schichten zu oszillieren, ab 24 Pa ist die Struktur nicht mehr zu erkennen; Der Kristall ist „geschmolzen“. Durch Verringerung des Druckes wird die Partikelladung der Teilchen und damit der Parameter Γ kleiner. Zudem verringert sich die Reibung der Partikel an den Gasatomen, wodurch die kinetische Energie der Partikel weiter erhöht wird. Dadurch wird die Kristallstruktur aufgebrochen.

2.6.2. Änderung der Spannung

Bei 40 Pa erhöhen wir nun die Spannung von 0,15 V auf 1,5 V. Der Kristall wird dabei vertikal zusammengedrückt und horizontal gestreckt. Hierbei ändern sich die Teilchenabstände in vertikaler Richtung von etwa 6,25 zu 6 Pixeln, in horizontaler Richtung bleibt der Teilchenabstand konstant.

Schlußendlich wird die Spannung in 0,01 V Schritten heruntergefahren: Der Kristall erlangt zunächst wieder seine ursprünglichen Ausdehnungen. Bei einer Spannung von 0,11 V ist das elektrische Feld nicht mehr stark genug um das Plasma zu erhalten und die Partikel stürzen aufgrund der Erdbeschleunigung abrupt herab.

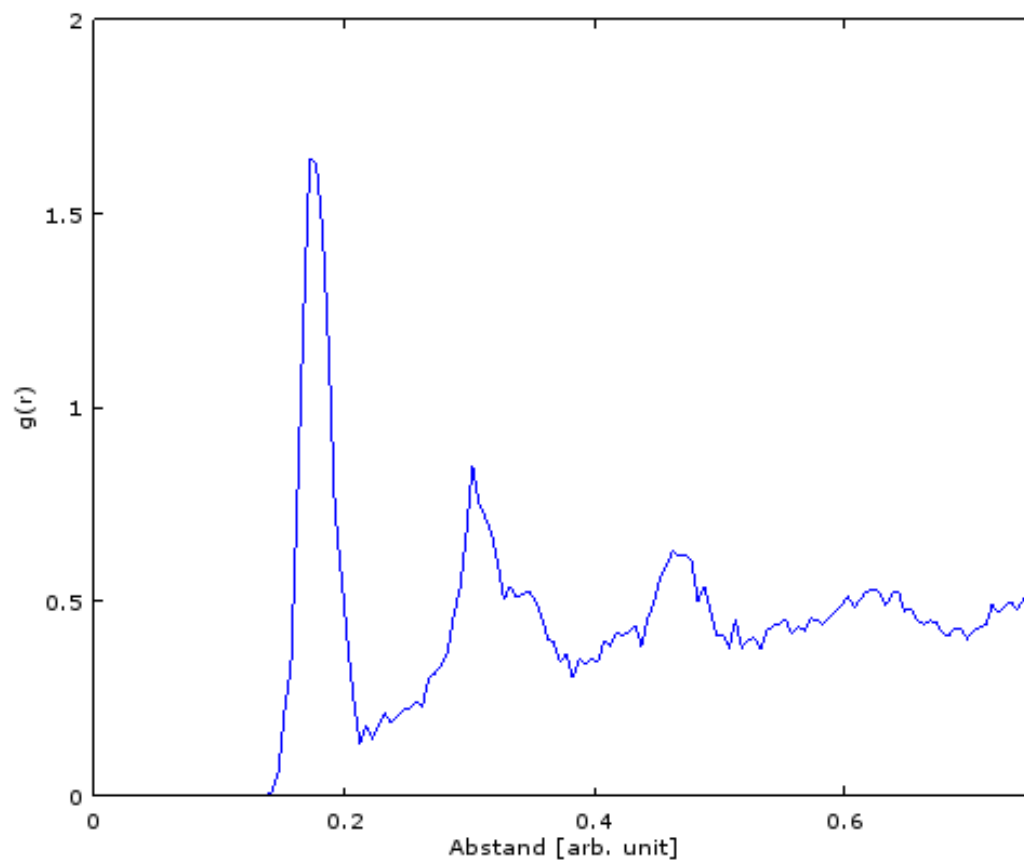


Abbildung 2.5.: Paarkorrelationsfunktion des Kristalls

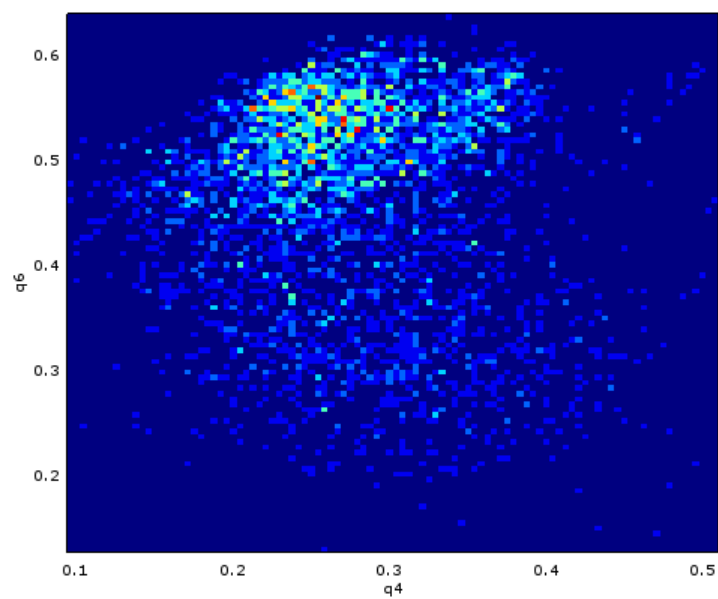


Abbildung 2.6.: Bond-Order-Parameter; 8 Nachbarn

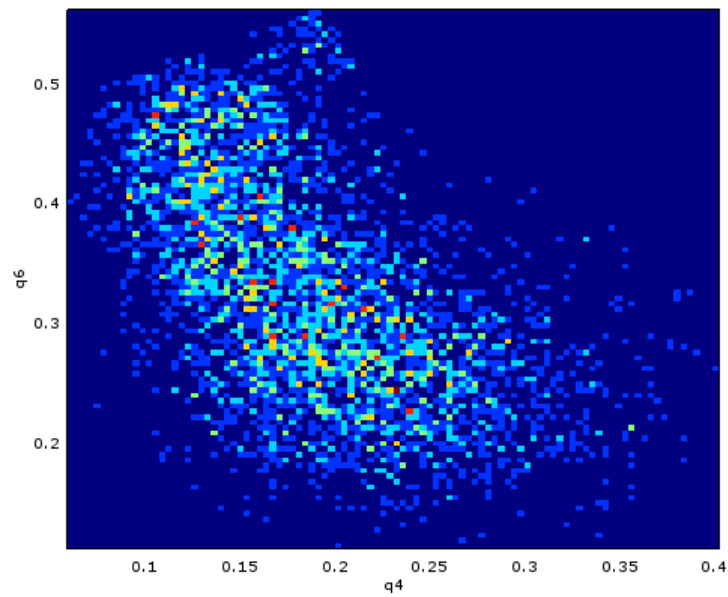


Abbildung 2.7.: Bond-Order-Parameter; 12 Nachbarn



Abbildung 2.8.: Partikelwolke bei 32 Pa



Abbildung 2.9.: Partikelwolke bei 24 Pa

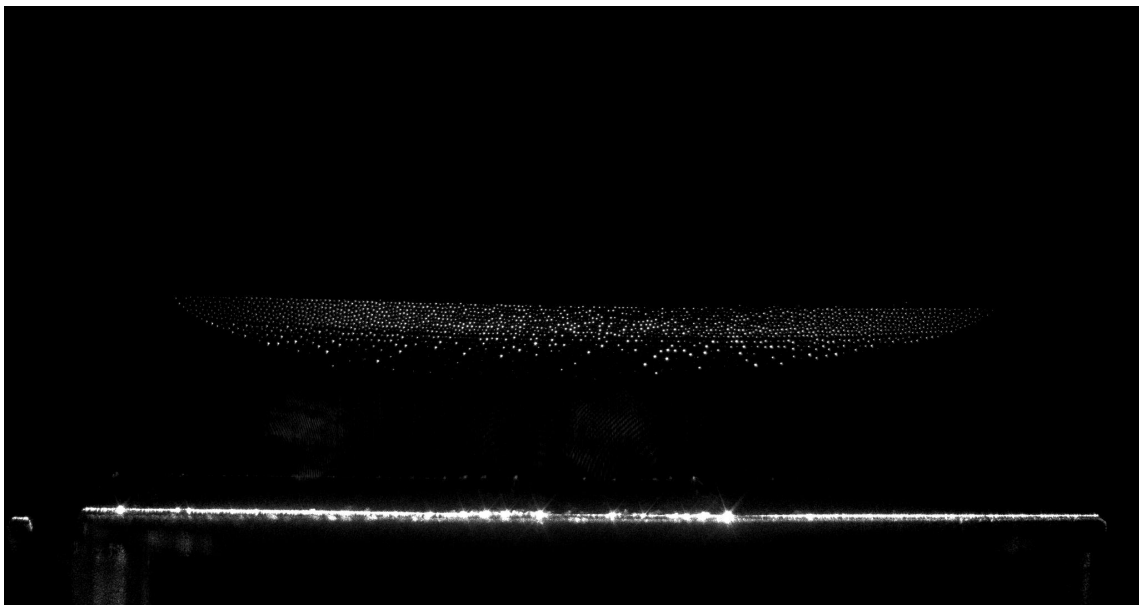


Abbildung 2.10.: Partikelwolke bei 0,15 V



Abbildung 2.11.: Partikelwolke bei 1,5 V

3. Fazit

Alle theoretischen Überlegungen in der Vorbereitung sind mit unseren Messungen bestätigt. Der Versuch ist ein interessante Möglichkeit ein aktuelles Forschungsthema kennenzulernen und wurde erfolgreich durchgeführt.

Anhang

A. Graphen

A.1. BCC-Gitter

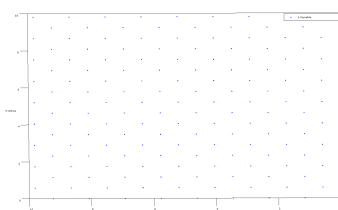


Abbildung A.1.:
BCC: xy-Ebene

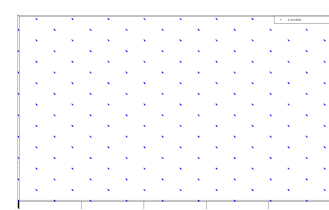


Abbildung A.2.:
BCC: xz-Ebene

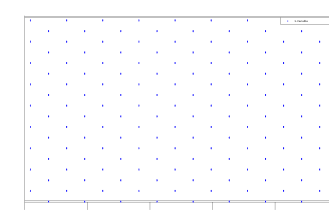


Abbildung A.3.:
BCC: yz-Ebene

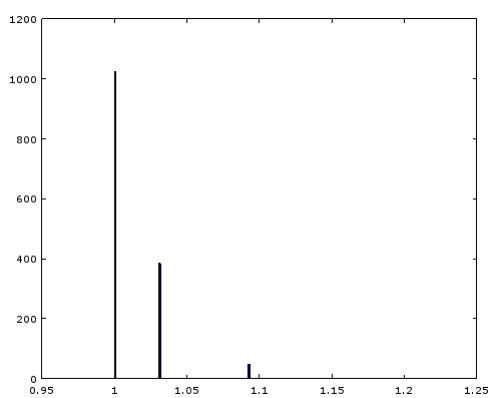


Abbildung A.4.: BCC: Teilchenabstände

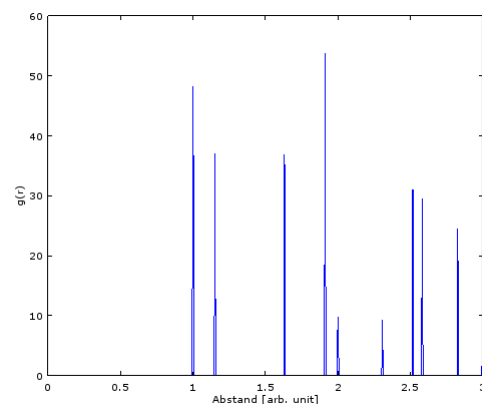


Abbildung A.5.: BCC: Paarkorrelationsfunktion

A.2. FCC-Gitter

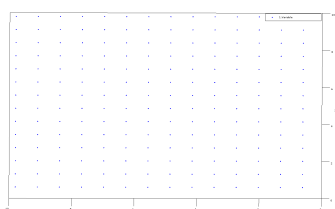


Abbildung A.6.:
FCC: xy-Ebene

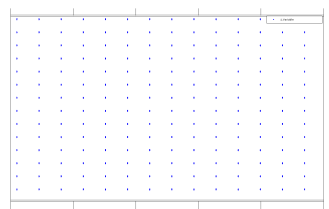


Abbildung A.7.:
FCC: xz-Ebene

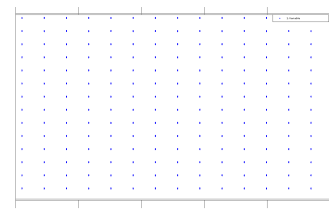


Abbildung A.8.:
FCC: yz-Ebene

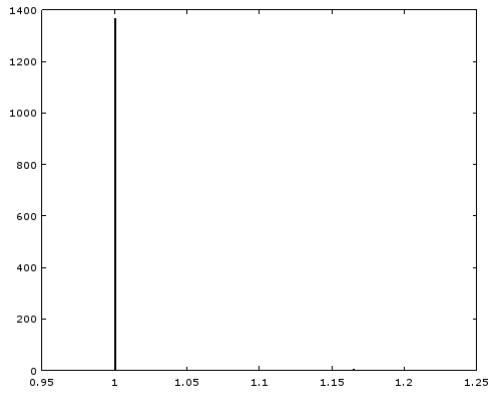


Abbildung A.9.: FCC: Teilchenabstände

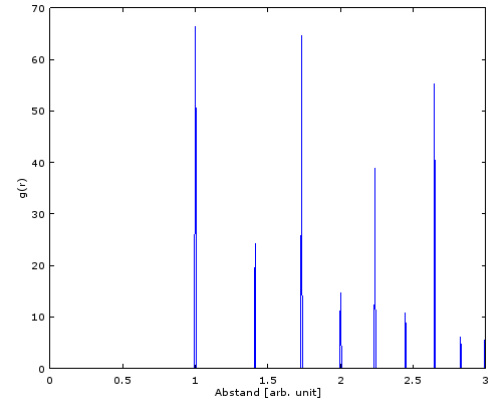


Abbildung A.10.: FCC: Paarkorrelationsfunktion

A.3. HCP-Gitter

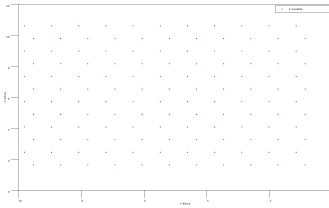


Abbildung A.11.:
HCP: xy-Ebene

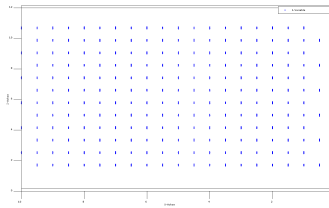


Abbildung A.12.:
HCP: xz-Ebene

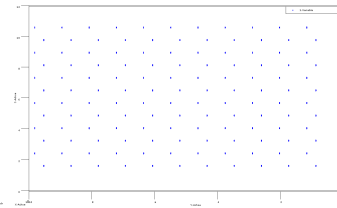


Abbildung A.13.:
HCP: yz-Ebene

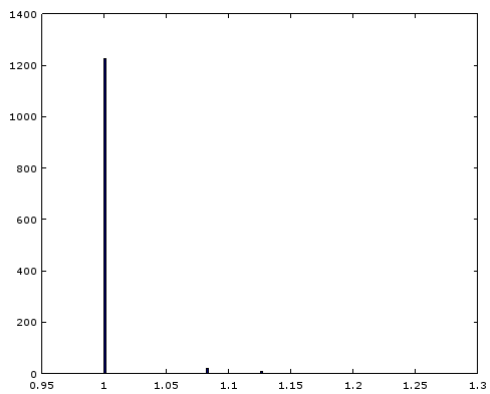


Abbildung A.14.: HCP: Teilchenabstände

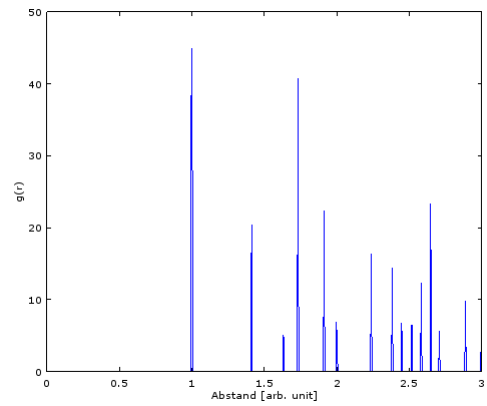


Abbildung A.15.: HCP: Paarkorrelationsfunktion

B. Messwerte

Horizontale Abstände

	Mitte – unten	Mitte - halbe Höhe	Halber Radius – unten	halber Radius - halbe Höhe	
	6.75	8	8.36	8.5016	
	7.125	8.75	8.2971	9.2525	
	7.6833	9.75	8.4	9.208	Anzahl:
Mittelwerte:	7.19	8.83	8.35	8.99	Mittelwert: 192.57894

Vertikale Abstände

	6.3433	6.8333	6.4	6.604	
	6.6	6.2	5.2	7.2	
	5.25	5.8333	5.75	7.755	Anzahl:
Mittelwerte:	6.06	6.29	5.78	7.19	Mittelwert: 146.16603

Tabelle B.1.: Messwerte zur Anzahlbestimmung

Horizontale Weite in mm ???	Horizontale Anzahl	Anzahl Grundfläche
1409	168.94	22415.83
vertikale Weite in mm ???	vertikale Anzahl	Anzahl Volumen
120	18.96	425004

Tabelle B.2.: Anzahlbestimmung

Literaturverzeichnis

- [1] Anleitung.
- [2] Casio fx-991ES-Taschenrechner.
- [3] W. Demtröder. *Experimentalphysik 4 - Kern-, Teilchen- Und Astrophysik*. Springer DE, Berlin, 3. auflage edition, 2010.