

Bachelorarbeit

Charakterisierung von Graphitelektroden in Diamant

Characterisation of graphite electrodes in diamond

angefertigt von

Helge Christoph Beck

aus Göttingen

am II. Physikalischen Institut

Arbeitsnummer: II.Physik-UniGö-BSc-2013/10

Bearbeitungszeit: 8. April 2013 bis 15. Juli 2013

Erstgutachter: Priv.Doz. Dr. Jörn Große-Knetter

Zweitgutachter: Prof. Dr. Arnulf Quadt

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Detektortheorie	3
2.1.1. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie	3
2.1.2. Siliziumspurdetektoren	5
2.1.3. Eigenschaften und Vergleich von Silizium und Diamant	6
2.1.4. 3D-Diamantdetektor	8
2.2. Graphitisierung von Diamant mittels eines Femtosekundenlasers	9
2.2.1. Theoretische Beschreibung	9
2.2.2. Ungewissheiten bei der Anwendung für einen 3D-Detektor	12
2.3. Optische Spannungsmessung	13
3. Experimentelle Vorgehensweise	15
3.1. Graphitisierung des Diamanten	15
3.1.1. Parameterraum	15
3.1.2. Versuchsaufbau	17
3.1.3. Durchführung	19
3.2. Optische Spannungsmessung	23
3.2.1. Versuchsaufbau	23
3.2.2. Messung	25
4. Ergebnisse	27
4.1. Graphitisierung des Diamanten	27
4.2. Analyseverfahren zur optischen Spannungsmessung	28
4.2.1. Verarbeitung der Bilder durch Quotientenbildung von Grauwerten	28
4.3. Beobachtungen anhand der Bilder des Quotienten	30
4.4. Werte für den Quotienten	32
4.4.1. Untergrund des Diamanten	32
4.4.2. Profillinien	33

Inhaltsverzeichnis

4.4.3. Mittelwerte des Quotienten in Ausschnitten mit sechs Säulen	36
4.4.4. Mittelwerte des Quotienten in Ausschnitten mit zwölf Säulen	39
5. Zusammenfassung und Ausblick	43
A. Graphen, Tabellen und Formeln	45
A.1. Diamantdicke	45
A.2. Formel für den Brechungsindex im Diamanten	45
A.3. Graphen	45
B. Bilder	51

1. Einleitung

In der Hochenergiephysik sind Spurdetektoren aus Silizium ein häufig eingesetztes Mittel, um die Trajektorie eines Teilchens zu bestimmen. Dadurch kann auch der Impuls gemessen werden, wenn der Detektor in einem Magnetfeld stationiert ist. In Vielzahl Detektoren an Hadron-Beschleunigern wie dem Large Hadron Collider (LHC) sind sie deswegen nahe am Interaktionspunkt der Teilchen zu finden. Dort sind sie hohen Strahlenbelastungen ausgesetzt und altern schnell.

Deswegen ist man auf der Suche nach strahlenhärteren Materialien, besonders da die Interaktionsraten in Zukunft weiter steigen werden. Eine Möglichkeit wäre, Diamant statt Silizium zu verwenden. Die Herausforderung dabei ist, dass in Diamant sich bewegende Ladungen an Fehlstellen gefangen werden. Die Ladungen werden aber für das Signal des Detektors benötigt. Diamanten können deswegen mit der *charge collection distance* (CCD) beschrieben werden, die angibt wie weit sich ein Elektron-Loch Paar voneinander im Mittel entfernt. Mit Ausleseelektroden, die einen geringeren Abstand haben als die CCD könnte man das Problem umgehen.

Mit einem 3D-Detektor könnte man dies erreichen. Dabei sind die Elektroden nicht wie gewöhnlich auf der Oberfläche des Sensors angebracht, sondern ins Material selber eingebracht. Für Diamant könnten solche Elektroden mit der Methode der Graphitisierung durch einen Femtosekundenlaser erzeugt werden. Dabei wird die Kohlenstoffbindung im Diamanten aufgelöst und neu zu Graphit zusammengefügt.

In dieser Arbeit sollen solchermaßen erzeugte Graphitelektroden im Diamant anhand der mechanischen Spannung, die um sie bei der Produktion entsteht, charakterisiert werden. In Kapitel 2 wird zuerst auf die Detektorphysik von Silizium und Diamant eingegangen, dann die Graphitisierungsmethode dargelegt und zuletzt die Theorie zur optischen Spannungsmessung dargelegt. Die experimentellen Vorgehensweisen bei der Graphitisierung und der Spannungsmessung werden in Kapitel 3 beschrieben. Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 vorgestellt und verglichen.

2. Grundlagen

Die Versuche mit Diamanten zielen daraufhin, einen Spurdetektor mit Diamant als Sensormaterial zu entwickeln. Deswegen wird im ersten Teil Detektortheorie, Abschnitt 2.1, auf die Wechselwirkung der Teilchen mit Materie kurz und auf den Standardspurdetektor mit Silizium als Material eingegangen. Dann wird verglichen welche Vor- oder Nachteile Diamant zu Silizium hat, warum also man es als Sensormaterial verwenden könnte. Daraus abgeleitet wird ein mögliches Konzept eines Detektors vorgestellt. Der zweite Teil, Abschnitt 2.2 beschäftigt sich mit der Umsetzung des Konzepts.

Der letzte Teil, Abschnitt 2.3, ist die zugrundeliegende Theorie zur Messung der mechanischen Spannung im Diamanten.

2.1. Detektortheorie

Dieser Abschnitt beinhaltet keine Theorie, die alle möglichen Detektortypen umfasst, sondern nur die Siliziumspurdetektoren und mögliche diamantene.

Mit Spurdetektoren soll die Trajektorie eines Teilchen rekonstruiert werden. Dazu werden mit mehreren Lagen Spurpunkte durch Wechselwirkung der Teilchen mit dem Material aufgenommen. Legt man zusätzlich ein Magnetfeld an, kann aus der Ablenkung der geladenen Teilchen deren Impuls bestimmt werden.

Um einen Detektor konstruieren zu können, ist es also nötig, etwas über die Wechselwirkung zu wissen.

2.1.1. Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Schwere geladene Teilchen, sprich alle außer Elektronen und Positronen, verlieren ihre Energie hauptsächlich durch Ionisation im Material. Der mittlere Energieverlust pro Weglänge wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben [1]:

$$\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = -4N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I^2} T_{max} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right] \quad (2.1)$$

2. Grundlagen

N_A	Avogadrozahl
r_e	klassischer Elektronenradius
m_e	Elektronenmasse
c	Vakuumlichtgeschwindigkeit
z	Ladung des wechselwirkenden Teilchens in Elektronenladungen
ρ	Dichte des Materials
Z	Ordnungszahl des Materials
A	Massenzahl des Materials
β	relativistische Geschwindigkeit
γ	Lorentzfaktor
I	mittlere Ionisationsenergie
T_{max}	maximaler Energieübertrag bei einer Wechselwirkung
δ	Korrekturterm

Tab. 2.1.: Verwendete Symbole in Gleichung (2.1).

Eine Erklärung der vorkommenden Symbole findet sich in Tabelle 2.1. Der Verlauf für Myonen in Kupfer ist abhängig von $\beta\gamma$ in Abbildung 2.1 dargestellt [2]. Mit zunehmender Energie der Teilchen nimmt der Energieverlust proportional zu $\beta^{-5/3}$ ab und erreicht ein Minimum bei $\beta\gamma = 3.5$. Dann steigt der Verlust durch relativistische Effekte, erreicht aber ein Plateau. Betrachtet man den Weg eines Teilchen durch ein Material, liest man den Graphen von rechts nach links und erhält, dass das Teilchen die meiste Energie kurz bevor es gestoppt wird verliert.

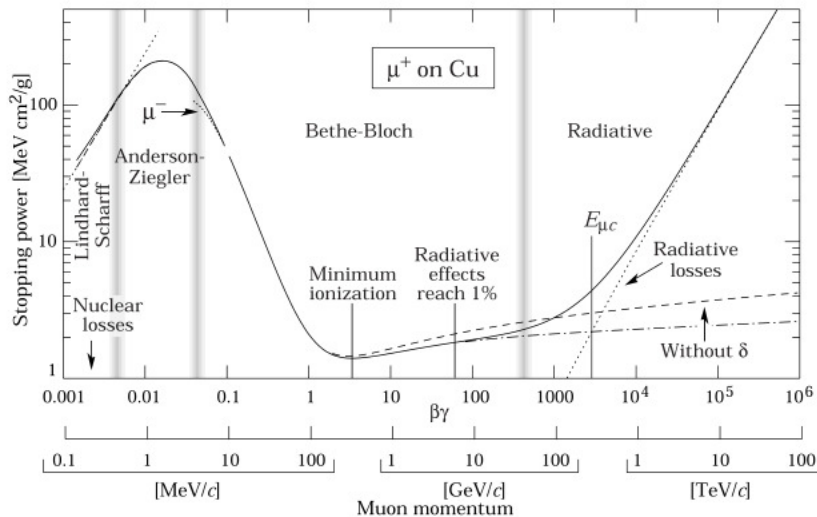


Abb. 2.1.: Verlauf der Bethe-Bloch-Formel für Myonen in Kupfer [2].

Leichte geladene Teilchen wie Elektronen, Positronen und zum Teil auch Myonen inter-

agieren mit Material auch durch Ionisation, aber ab Teilchenenergien im unteren MeV Bereich wird der Energieverlust durch Bremsstrahlung dominant. Eine wichtige Größe dabei ist die Strahlungslänge X_0 , die beschreibt, nach welcher Distanz das Teilchen nur noch $1/e$ der ursprünglichen Energie hat.

2.1.2. Siliziumspurdetektoren

Siliziumspurdetektoren sind ein Standardwerkzeug zur Spurbestimmung von Teilchen an Hochenergie-Experimenten. Deswegen werden sie hier als Vergleich für Diamantdetektoren verwendet.

Silizium ist ein Halbleiter und kann deswegen gut im Bändermodell der Energieniveaus durch Valenz- und Leitungsband beschrieben werden [3]. Beim Durchgang eines Teilchen in Silizium entstehen durch Ionisation oder Anregung eines Elektrons in das Leitungsband bewegliche Elektron-Loch-Paare (e/h -Paare). Um diese als Signal in einem Detektor zu verwenden darf keine Rekombination stattfinden. Dazu verwendet man p- und n-dotiertes Silizium. Bringt man diese beiden Materialien zusammen, kombinieren die zusätzlichen Ladungen aus den Dotierungen und es entsteht eine Verarmungszone ohne Ladungen. Diese Zone hat eine begrenzte Dicke wegen der begrenzten Mobilität der Ladungsträger. Durch die restlichen Ladungen wird ein elektrisches Feld in der Verarmungszone induziert, das dort entstehende e/h -Paare voneinander wegdriften lässt. Durch Anlegen einer äußeren Versorgungsspannung in Sperrichtung, die restlichen Ladungen werden abgezogen, an Elektroden an der Oberfläche kann die Verarmungszone auf das gesamte Material ausgedehnt werden. Dies ist erforderlich, da nur in diesem Bereich das Signal nachgewiesen werden kann. Die entstehenden e/h -Paare werden durch das Feld getrennt und erzeugen beim Driften durch das Material ein Signal auf den Elektroden nach dem *Ramothorem* [4], das die instantan gesammelte Ladung i_k beschreibt:

$$i_k = q\vec{v}E_W. \quad (2.2)$$

Die gesamte deponierte Ladung ist q , \vec{v} die Geschwindigkeit der Ladungen und E_W ist das gewichtete Feld aus Elektrodenkonfiguration und angelegter Spannung. Das gesamte Signal erhält man durch Integration über die Signallänge.

Eine neue Entwicklung ist die Verwendung von Elektroden im Silizium selber in sogenannten 3D-Detektoren [5] statt der planaren Anordnung mit Elektroden an der Oberfläche. In das Silizium werden dazu Löcher geätzt und diese mit passendem Elektrodenmaterial, dafür dotiertes Silizium, aufgefüllt. Durch diese Anordnung braucht man geringere Spannungen um den Sensor zu verarmen, da die Elektroden dichter beieinander sind. Diese

2. Grundlagen

Nähe ermöglicht wegen der kurzen Driftzeiten eine schnelle Auslese des Signals, was nötig ist für hohe Ereignisraten im Detektor.

2.1.3. Eigenschaften und Vergleich von Silizium und Diamant

Die Diamanten, die hier verwendet werden, sind keine natürlichen, sondern künstlich hergestellte mit dem *chemical vapour deposition* CVD Verfahren. Dabei wird aus einem Plasma, aus meist Methangas mit Wasserstoff, Kohlenstoff auf eine Oberfläche deponiert [6]. Auf Grund der gewählten Parameter von Temperatur und Druck entsteht eine Diamantstruktur. Je nach Oberfläche, auf der der Diamant entsteht, können Polykristalle oder Einkristalle produziert werden. Die Polykristalle zeichnen sich durch ihre verschiedenen angeordneten Körner aus und können großflächig hergestellt werden, da man relativ frei in der Wahl der Depositionsoberfläche ist. Für Einkristalle wird selber ein Einkristall als Startmaterial benötigt, wodurch die Größe begrenzt wird. Preislich sind deswegen die Polykristalle von Vorteil.

Da dieses Verfahren noch nicht sehr verbreitet ist, ist die Abhängigkeit von den Herstellern groß und somit ein Nachteil für Detektoren aus Diamanten. Silizium hingegen wird industriell in großen Mengen und Reinheit hergestellt und ist somit leichter zugänglich.

Eigenschaft	Diamant	Silizium
Bandlücke [eV]	5.5	1.12
Durchbruchfeld [V/cm]	10^7	3×10^5
Widerstand [Ω cm]	$> 10^{11}$	2.3×10^5
intrinsische Ladungsdichte [cm^{-3}]	$< 10^3$	1.5×10^{10}
Dichte [g cm^{-3}]	3.52	2.33
dielektrische Konstante	5.7	11.9
Dislokalisationsenergie [eV/Atom]	43	13-20
nötige Energie für ein e/h -Paar [eV]	13	3.6
Strahlungslänge [cm]	12.2	9.4
durchschn. erzeugtes Signal / μm [e]	36	89

Tab. 2.2.: Eigenschaften von Diamant und Silizium [4].

In Tabelle 2.2 sind einige relevante Eigenschaften von Diamant und Silizium aufgelistet [4]. Mit einer Bandlücke von 5.5 eV ist Diamant ein Isolator, deswegen ist die benötigte Energie um ein e/h -Paar zu erzeugen größer als bei Silizium und das durchschnittlich erzeugte Signal/ μm ist somit auch ungefähr 2.5-mal kleiner. Dazu trägt auch die um 30% längere Strahlungslänge von Diamant bei, weil bei gleicher Detektordicke weniger Energie, sprich

Signal, deponiert wird.

Siliziumdetektoren brauchen eine Verarmungszone, weil sie viele intrinsische Ladungen haben, so dass immer eine Spannung angelegt werden muss. Zur Kompensation von Strahlungsschäden, durch die mehr Ladungen entstehen, muss diese noch erhöht werden. Diamant hat nur wenige Ladungsträger und bräuchte eine solche Spannung nicht. Die angelegte Spannung dient zur Sammlung des Signals und kann hoch sein, weil erst bei 10^7 V/cm Durchbrüche erwartet werden. Zusätzlich erhöht sich die Driftgeschwindigkeit mit höherem elektrischem Feld, was zu schnelleren Signalen führt.

Für ein Detektormaterial ist aber nicht nur das Signal alleine sondern auch das Signal-Rausch-Verhältnis wichtig. Da ist die größere Bandlücke von Vorteil, weil thermische Anregungen, wie Leckströme im Silizium, dadurch unterdrückt werden und das Rauschen im Material verringert wird. Auch der um mehr als eine Größenordnung höhere Widerstand im Vergleich zu Silizium verringert die Leckströme.

Die Kapazität von Diamant ist wegen der nur halb so großen dielektrischen Konstante kleiner als für Silizium, wodurch das Rauschen durch die geringere Belastung der Auslese vermindert wird.

Für zukünftige Hochenergie-Teilchenexperimente mit hohen Ereignisraten wird eine große Rolle die Strahlenhärte, d.h. die Erhaltung der Detektoreigenschaften und Qualitäten trotz Strahlenbelastung, spielen. Diamant könnte dafür ein geeignetes Material sein, weil die benötigte Energie um ein Atom aus dem Gitter zu lösen ungefähr doppelt so hoch ist wie bei Silizium.

Da Diamant eine hohe thermische Leitfähigkeit hat [6], braucht es nicht oder nur wenig gekühlt zu werden, was die Kosten und den Platzbedarf eines Detektors senkt.

Zusätzlich dazu kommt das sogenannte Trapping im Diamanten, das Einfangen von Ladungen an Fehlstellen. Deshalb ist eine weitere wichtige Eigenschaft von Diamant die CCD: charge collection distance [4]. Sie beschreibt, wie weit sich e/h -Paar im Mittel voneinander entfernen, bevor sie eingefangen werden. Durch Anlegen eines Feldes kann diese Distanz erhöht werden, solange die Driftgeschwindigkeit größer wird und nicht sättigt. So werden Distanzen um $200\ \mu\text{m}$ erreicht [4]. Die normale Dicke eines Sensors liegt aber bei $500\ \mu\text{m}$. Trotzdem können driftende Ladungen nach dem Ramo-Theorem, vergleiche Abschnitt 2.1.2, nachgewiesen werden, auch wenn sie nicht bis an die Elektroden auf der Oberfläche gelangen.

2.1.4. 3D-Diamantdetektor

Diamantdetektoren mit planaren Elektroden werden jetzt schon für den *Diamond beam monitor* (DBM) im Rahmen des IBL-Upgrade für den ATLAS-Detektor am CERN verwendet [4].

Um das Problem des Trappings der Ladungen im Diamanten zu umgehen, ist der erste Lösungsansatz dünnere Diamanten zu benutzen und so in den Bereich der CCD zu kommen. Weniger Sensormaterial bedeutet aber gleich auch weniger Signal beim Durchgang eines Teilchens. Dieser Verlust wird sehr wahrscheinlich nicht durch das geminderte Trapping aufgewogen. Außerdem kann der Diamant mechanisch instabil werden und unter Belastung brechen.

Eine andere Möglichkeit der Verbesserung von Diamantdetektoren bietet sich in einer

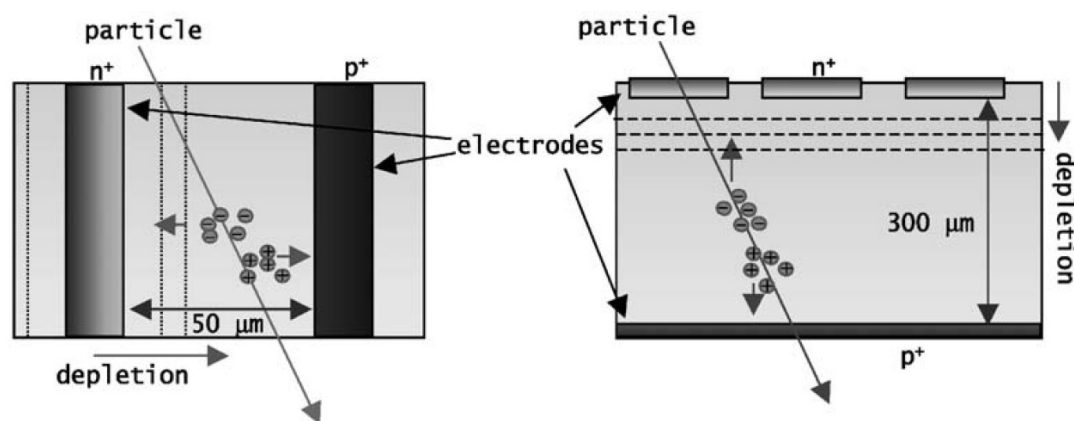


Abb. 2.2.: Vergleich der Anordnung von Elektroden im Material und an der Oberfläche [7].

3D-Anordnung von Elektroden im Material an, wie sie schon für Silizium umgesetzt wird. Damit wird der Abstand zwischen den Elektroden wesentlich verkleinert, vergleiche Abbildung 2.2: Von Sensormaterialdicke bei planaren Elektroden um die $500\ \mu\text{m}$ auf bis zu $50\ \mu\text{m}$ und weniger für 3D-Elektroden. Da die Elektroden wenig Platz beanspruchen, wird das Sensormaterial dadurch nur unwesentlich verringert und es wird die gleiche Anzahl von e/h -Paare induziert wie für planare Elektroden. Weil durch die kürzeren Distanzen, kürzer auch als die mindestens erwartete CCD von $50\ \mu\text{m}$ [4], die Wahrscheinlichkeit des Trapping sinkt, können die Paare die Elektroden erreichen. So verliert man weniger Signal durch Trapping und kann auch minderwertige Diamanten benutzen, wodurch die Kosten sinken.

Wenn man die Elektroden geschickt ausliest, kann man auch die Ortsauflösung des Detektors erhöhen, weil durch die Anordnung eine viel höhere Segmentierung gegeben ist als bei

planaren Elektroden. Zieht man die Elektroden von jeder Seite jeweils nicht ganz bis zur anderen Seite, vereinfacht sich die Auslese. Es brauchen dann nicht jede Säule metallisiert und dann kontaktiert werden, sondern es können großflächige planare Metallisierungen angebracht werden. Dies gewährleistet eine Anode und eine Kathode zur Ladungssammlung.

Da Diamant chemisch wie auch mechanisch sehr inert ist, muss eine spezielle Methode für die Erzeugung der Elektroden gefunden werden. Ein mögliche könnte die Graphitisierung mittels eines Femtosekundenlasers sein.

2.2. Graphitisierung von Diamant mittels eines Femtosekundenlasers

2.2.1. Theoretische Beschreibung

Graphitisierung von Diamant bedeutet, dass die sp^3 -Bindungen des Diamanten umgewandelt werden in sp^2 -Bindungen von Graphit. Dazu wird Energie benötigt. Diese kann durch einen gepulsten Laser, insbesondere einen Femtosekundenlaser, zur Verfügung gestellt werden [8]. Wichtig dabei ist eine Fokussierung des Strahls auf eine kleine Fläche. Zu unterscheiden ist Graphitisierung an der Oberfläche und im Diamanten [8].

Graphitisierung an der Oberfläche

An der Oberfläche ist das Diamantgitter nicht vollständig und kann einfacher aufgelöst werden. Obwohl Diamant für ein weites Spektrum von Licht transparent ist, werden durch den hohen Energiefluss des Laser Multiphotonenionisationen verursacht und Elektronen ausgelöst. Diese können durch weitere inverse Bremsstrahlung genug Energie erhalten, dass sie bei einem Stoß mit einem Kohlenstoffatom dieses ionisieren und so die Graphitisierung bewirken. Es wird beobachtet, dass für einen intensiven Picosekundenlaser mit einem Energiefluss von $E = 10 \text{ J cm}^{-2}$ ein Puls ausreicht, um die Transparenz des Diamanten deutlich zu verringern, also lichtundurchlässiges Graphit zu erzeugen. Bei niedrigeren Flüssen werden weitaus mehr Pulse benötigt oder es findet gar keine Umwandlung statt. Mit Ramanspektroskopie wird die Erzeugung von Graphit bei diesen Vorgängen bestätigt.

Ein anderer Punkt ist die Bildung von Kratern an der Oberfläche durch Zünden eines Plasmas für kurze Laserpulse, wodurch sich der Fokus verkleinert.

Graphitisierung im Diamanten

Für Graphitisierung im Material werden sichtbare oder infrarote (IR) Laser benutzt, damit sie nicht absorbiert werden. Es wird beobachtet, dass der Beginn der Umwandlung erst für viel höhere Energieflüsse von $E_b = 10 - 50 \text{ J cm}^{-2}$ als an der Oberfläche passiert und nur eine geringe Abhängigkeit von der Pulsdauer zeigt. Dafür werden als Erklärung Inkubationseffekte herangezogen, dass die ersten Pulse Mikrodefekte erzeugen, an denen die Graphitisierung schneller vonstatten geht. Die Mikrodefekte oder Fehlstellen im Diamant stören die Gitterordnung und senken die benötigte Energie um Atome auszulösen. Dadurch kommt man dem Effekt an der Oberfläche näher. Sinkt die Schwelle bis zur Energie des Pulses, kann Graphitisierung eintreten. Ansonsten werden höhere Flüsse benötigt. Hält man den Fokus im Diamanten fest, wird die erste entstehende Struktur aus Graphit mit den weiteren Pulsen in Richtung Laser wachsen, denn Graphit ist nicht transparent und absorbiert den Laser, so dass strahlabwärts des Graphits keine weitere Umwandlung geschehen kann. Gleichzeitig können weiter strahlaufwärts bei ausreichender Energie weitere Mikrodefekte erzeugt werden, an denen Graphitisierung stattfindet, bevor die erste Struktur bis dorthin gewachsen ist. Es entstehen diskrete Strukturen im Diamanten, siehe Abbildung 2.3. Noch weiter strahlaufwärts gibt es einen Punkt, ab dem keine neuen isolierten Strukturen generiert werden können. Dafür ist es immer noch möglich, dass von der letzten bestehenden Struktur aus weiter Graphit in Richtung Laser wächst, weil der benötigte Energiefluss für Graphitisierung an bestehendem Graphit mit $E \approx 1 \text{ J cm}^{-2}$ weitaus geringer ist, als der für die erste Umwandlung. Es bildet sich eine kontinuierliche Struktur.

Dieses Verhalten lässt sich mit zwei Modellen erklären [8]. Das erste geht davon aus, dass

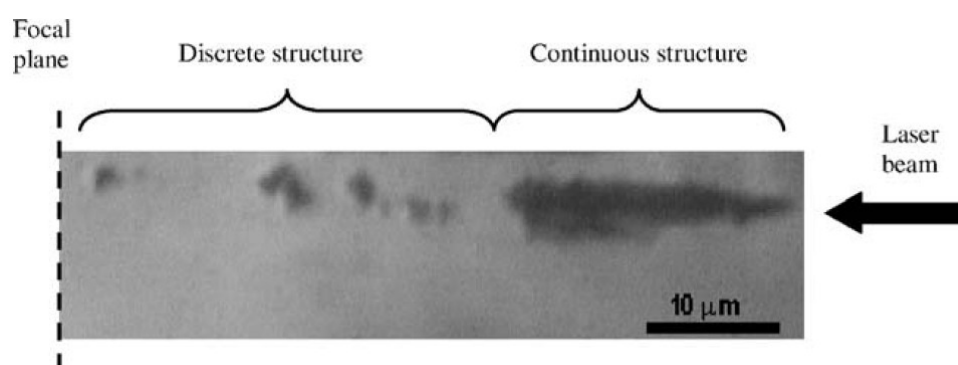


Abb. 2.3.: Entstehung von diskreten und kontinuierlichen Graphitstrukturen in Diamant mit 120 fs Pulslänge und Laserenergie von 320 nJ bei Fokusbereich von 3 µm [8].

das Graphit durch den Laser stark erhitzt wird. Diese Wärme breitet sich dann in den

2.2. Graphitisierung von Diamant mittels eines Femtosekundenlasers

Diamanten aus und verursacht die Graphitisierung. Außerdem strahlt das warme Graphit auch UV- und Röntgenstrahlung aus, die auch zur Umwandlung beitragen. Das zweite Modell beinhaltet schnelle Elektronen aus dem bestrahlten Graphit, die in den Diamanten gelangen und dort für Graphitisierung sorgen.

Bewegt man den Fokus durch den Diamanten, können so Kanäle oder Säulen aus Graphit gezogen werden. Mit nicht zu großen Winkeln können auch gebogene Formen erzeugt werden. Die Säulendicke kann mit gut gewählten Parametern dünner als die Fokusbreite gemacht werden und es wurden schon Durchmesser von unter $2\ \mu\text{m}$ erreicht. Wichtige Parameter dafür sind die Pulsenergie und die Fokusgeschwindigkeit, wobei die Abhängigkeit von der Fokusgeschwindigkeit noch keine hinreichende Erklärung hat. Mit kleineren Durchmessern wird auch die Homogenität der Säulen schlechter.

Ein wichtiger Punkt ist, das Graphit eine nur ungefähr halb so große Dichte hat wie Dia-

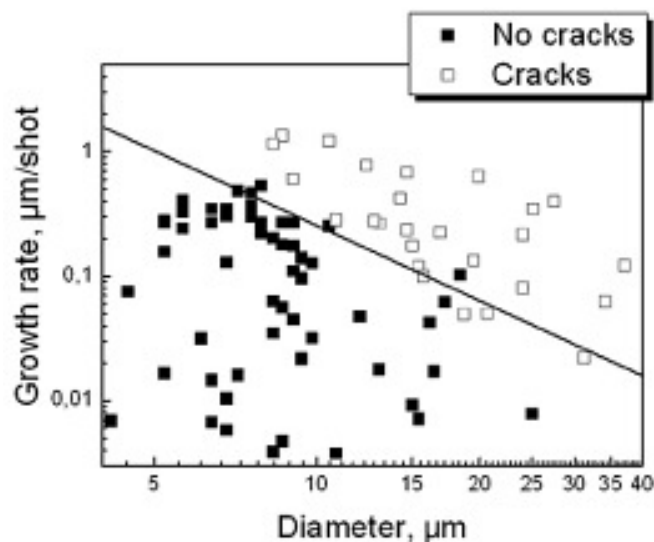


Abb. 2.4.: Brüche im Diamanten in Abhängigkeit des Säulendurchmessers d und der Rate der Graphitisierung V [8].

mant. Wegen des größeren Volumens des Graphits wird deswegen erwartet, dass mechanische Spannung im Diamanten erzeugt wird. Das Auftreten von Brüchen im Diamanten wird hauptsächlich mit den Größen Säulendurchmesser d und wie schnell sich die Graphitisierung fortbewegt V parametrisiert. Eine Zusammenfassung von vielen Säulen mit unterschiedlichen Laserparametern ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Es gibt zwei Bereiche, die von der Linie $V = 80/(\pi d^2)$ getrennt werden. Unterhalb dieser Linie werden keine Brüche beobachtet.

2.2.2. Ungewissheiten bei der Anwendung für einen 3D-Detektor

Graphit als Elektroden in einem 3D-Diamantdetektor wäre eine gute Wahl, weil es eine hohe elektrische Leitfähigkeit hat. Durch die Graphitisierung mit einem Femtosekundenlaser könnte man die Elektroden aus dem Diamanten selber machen und bräuchte kein zusätzliches Material und keine Löcher für dieses.

Die dünnen Säulen würden ein hohes Feld um sich erzeugen, wodurch das Signal schneller eingesammelt wird oder die Versorgungsspannung niedrig gehalten werden kann.

Die Kontrolle der Graphitisierung ist bisher noch wenig erforscht. Wie gesehen, geschieht die Graphitisierung auch außerhalb des Fokus bei genug Energiefluss. Das bedeutet, dass Lücken in der Elektrode entstehen könnten und deren Homogenität deswegen nicht gewährleistet werden kann. Eine andere Unregelmäßigkeit, die auftreten könnte, ist Ausfransungen der Säulen, wodurch es beim Anlegen von Spannungen zu lokal hohen und inhomogenen elektrischen Feldern kommen kann. Dadurch wären Durchbrüche im Material möglich.

Die Verbindung von Graphit zum Diamanten ist wichtig, denn wenn die e/h -Paare alle an Fehlstellen zwischen den beiden Gitterstrukturen gefangen werden, verringert sich das gemessene Signal.

Die Elektroden sollten auch nicht durch das ganze Material gehen, damit wie in Abschnitt 2.1.4 erwähnt, eine einfachere Metallisierung verwendet werden kann. Dass die Graphitisierung an der Oberfläche bei geringeren Energieflüssen geschieht als im Diamanten, kann bei dieser Anwendung zum Problem werden. Genauso wie die Kraterbildung die Metallisierung erschweren oder vielleicht verhindern könnte. Dadurch wäre der zur Auslese nötige elektrische Kontakt nicht möglich.

An Fehlstellen oder Korngrenzen wie in Polykristallen häufig auftreten findet Graphitisierung bei niedrigeren Schwellenwerten statt. Das bedeutet die Säulen könnten unterbrochen werden, weil die Graphitisierung an einer anderen Stelle günstiger ist. Die Alternative zu Polykristallen sind Einkristalle, die teurer sind und somit die Kosten für einen Detektor steigen ließen.

Der mechanische Stress einer Säule beeinflusst, wie groß deren Abstand sein muss, damit die Säulen sich durch die Nachbarn nicht verändern.

Dies sind einige der offenen Fragen und die letzte von ihnen soll in dieser Arbeit behandelt werden.

2.3. Optische Spannungsmessung

Als Quelle dieses Abschnittes dient [9], besonders alle Formeln und Bezeichnungen sind daraus übernommen.

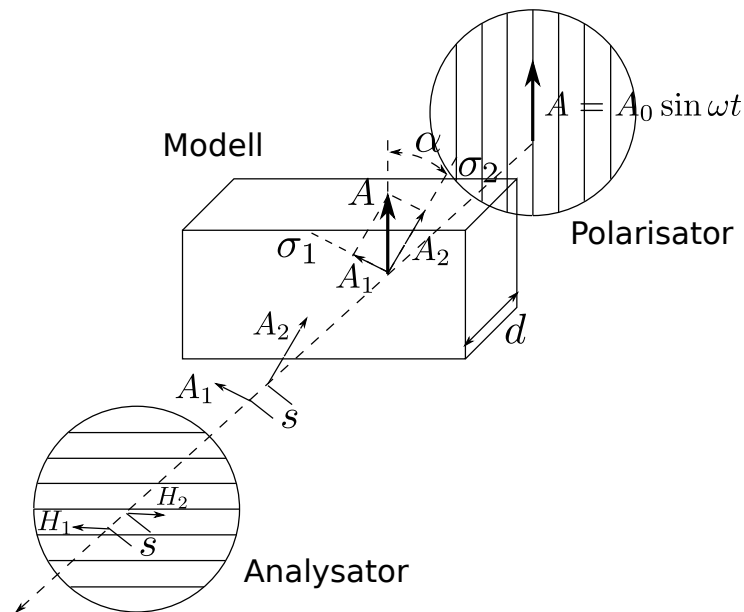


Abb. 2.5.: Skizze zur Zerlegung des Lichtstrahls in einer optischen Spannungsmessung, nach [9].

Der Aufbau einer optischen Spannungsmessung besteht aus folgenden Elementen in Reihenfolge der Strahlrichtung der Lichtquelle (siehe auch Abbildung 2.5): Ein linearer Polarisator, das zu untersuchende Objekt und ein weiterer linearer Polarisator, als Analysator bezeichnet. Sei das verwendete Licht monochromatisch mit einer Wellenlänge λ und nach dem ersten Polarisator die Amplitude parallel zu Polarisationsrichtung dargestellt als $A = A_0 \sin(\omega t)$ mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi c/\lambda$.

Betrachtet man einen Spannungszustand in einer Ebene im Material, kann man zwei Hauptspannungen σ_1 und σ_2 definieren, die senkrecht aufeinander stehen. Die Hauptrichtungen seien um den Winkel α gegenüber der Polarisationsrichtung gekippt. Der durchgehende Lichtstrahl kann nun in die Spannungsrichtungen aufgeteilt werden in A_1 bzw. A_2 . Durch die Verspannung verändert sich die Geschwindigkeit mit der das Licht in den beiden Richtungen durch das Material geht. Diese neuen Geschwindigkeiten sind proportional zu den Spannungen σ_1 und σ_2 . Diese Veränderung ist klein gegenüber der ursprünglichen Geschwindigkeit und stellt sich deswegen als Doppelbrechung dar.

Nach der Dicke d des Materials gibt es einen Gangunterschied s zwischen den Komponenten A_1 und A_2 aus dem man die Phasenverschiebung, den Gangunterschied pro

2. Grundlagen

Wellenlänge, $\delta = s/\lambda$ bekannt als Hauptgleichung der Spannungsoptik herleiten kann:

$$\delta = C(\sigma_1 - \sigma_2) \frac{d}{\lambda} \quad (2.3)$$

Dabei ist C eine Materialkonstante, in die die Proportionalitätsfaktoren der veränderten Geschwindigkeiten zu den Spannungen und die ursprüngliche Geschwindigkeit eingehen. Betrachtet man die Zerlegung von A in A_1 und A_2 entlang der Hauptspannungsrichtung, ergibt sich, dass die beiden Komponenten den gleichen entgegengesetzten Anteil H_1 bzw. H_2 senkrecht zum Polarisator haben, weil A keinen solchen hat. Passiert die Lichtwelle nun den Analysator, bleiben einzig diese Teile des Lichtes H_1 und H_2 übrig. Also hängt das resultierende Bild von der Phasenverschiebung δ und somit von der Spannungsdifferenz $\sigma_1 - \sigma_2$ ab. Für $\delta = 0$ oder eine ganze Zahl heben sich H_1 und H_2 auf und es ergibt sich Dunkelheit an dieser Stelle. Punkte mit gleichem ganzzahligem δ erscheinen als Linien, den Isochromaten, die nach Ordnungen bezeichnet werden. Zwischen diesen dunklen Linien hellt sich der Bereich auf und erreicht ein Maximum.

Liegt eine Hauptspannungsrichtung parallel zur Polarisationsrichtung, spaltet sich das Licht nicht in zwei Komponenten auf und es gibt keinen Phasenunterschied. Der Analysator absorbiert das Licht. Die so entstehenden Linien nennt man Isokline.

Wird nicht monochromatisches Licht verwendet, erscheint nur bei $\delta = 0$ die Auslöschung dunkel, weil die Phasenverschiebung Wellenlängen abhängig ist. Die höheren Ordnungen zeigen die Komplementärfarben der in der Reihenfolge kurzer zu langen ausgelöschten Wellenlängen. Da sich auch die Helligkeitsmaxima verschieben, verwaschen die Farben zu höheren Ordnungen. Als dunkle Linien heben sich davon die Isoklinen ab, weil sie nicht von der Wellenlänge abhängen.

3. Experimentelle Vorgehensweise

3.1. Graphitisierung des Diamanten

3.1.1. Parameterraum

Verwendeter Diamant

Zur Verfügung stehen vier polykristalline CVD Diamanten von optischer Qualität mit einer Größe von $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ Oberfläche und $500\text{ }\mu\text{m}$ Dicke laut Herstellerangaben. Der verwendete Diamant ist ein bisschen kleiner mit Kantenlängen von 4.8 mm und 4.95 mm bei einer Dicke von $(516 \pm 2)\text{ }\mu\text{m}$, Messwerte siehe Tabelle A.1. Die Oberflächen sind poliert. In Abbildung 3.1 ist ein Photo des Diamanten nach der Graphitisierung zu sehen. Die Wahl keinen Einkristall zu nehmen, ist darin begründet, dass man herausfinden will, ob polykristalliner Diamant nicht schon ausreichend für die Verwendung als Detektormaterial ist. Denn diese sind einfacher herzustellen und somit günstiger als Einkristalle.

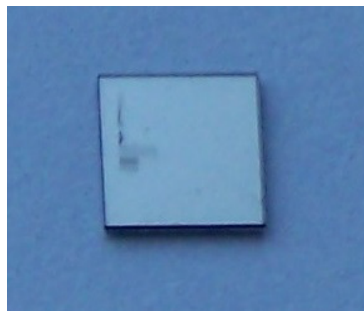


Abb. 3.1.: Photo des verwendeten Diamanten nach der Graphitisierung.

Parameter für die Graphitisierung

Um optische Spannungen beobachten zu können, wie sie auch in einem möglichen Detektor auftreten würden, werden die Graphitsäulen in Blöcken angeordnet, siehe Abbildung 3.2. Die Blöcke haben denselben Abstand zwischen den Säulen in einer Reihe und zur nächsten

3. Experimentelle Vorgehensweise

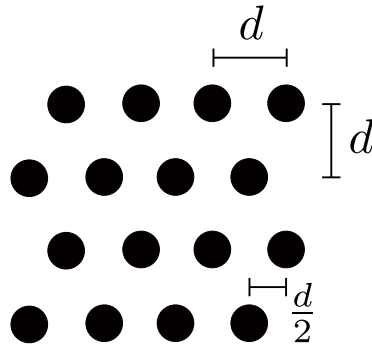


Abb. 3.2.: Skizze der Anordnung der Graphitelektroden im Diamant.

Reihe. Die Reihen mit gerader Nummer sind um die Hälfte des Abstandes eingerückt, sodass eine Geometrie ähnlich eines Dreiecksgitters entsteht.

Es gibt drei Arten von Blöcken:

1. 11 Blöcke mit 4×4 Säulen gezogen mit einer Fokusgeschwindigkeit von $50 \mu\text{m/s}$. Die einzelnen Blöcke haben einen Abstand von $50 \mu\text{m}$:
 - Laserleistung von 50 mW mit Säulenabständen von $50 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ je ein Block.
 - Laserleistung von 80 mW mit Säulenabständen von $40 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ je ein Block. Nach dem mit $40 \mu\text{m}$ Abstand wurde die zweite Justierung durchgeführt, weswegen ein größerer Abstand zu dem nächsten Block entstand.
 - Laserleistung von 120 mW mit Säulenabständen von $40 \mu\text{m}$ und $20 \mu\text{m}$ je ein Block.
2. 2 Blöcke mit 8×24 Säulen gezogen mit einer Fokusgeschwindigkeit von $50 \mu\text{m/s}$ und einer Laserleistung von 50 mW . Die Blöcke haben einen Abstand von $70 \mu\text{m}$ untereinander und zu dem über ihnen. Zu dem nächsten Block unter ihnen ist der Abstand $100 \mu\text{m}$. Innerhalb einer Reihe ist für je vier aufeinanderfolgende Säulen der Abstand des Fokus von der Oberfläche gleich, vergleiche Abbildung 3.3. Die verwendeten Abstände sind $5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$ und $30 \mu\text{m}$, so dass man auf 24 Säulen pro Reihe kommt. Für die ungeraden Reihen ist die Oberfläche die laserabgewandte Seite, im Folgenden Rückseite genannt, und für die geraden Reihen die laserzugewandte Seite, die Vorderseite. Die beiden Blöcke unterscheiden sich im Abstand der Säulen voneinander, nämlich ein Block mit $50 \mu\text{m}$ und der andere mit $25 \mu\text{m}$ Abständen.
3. 1 Block mit 3 mal 12 Säulen nicht im Dreiecksmuster sondern quadratisch angeordnet. Dieser Block soll nicht zur Spannungsmessung verwendet werden sondern um

3.1. Graphitisierung des Diamanten

die Abhängigkeit der Säulendicke von der Fokusgeschwindigkeit und der Laserleistung zu beobachten. Diese Analyse wird nicht in dieser Arbeit gemacht, aber da die Säulen im gleichen Versuch gezogen wurden, werden sie hier erwähnt. So werden für jeweils vier Säulen in einer Reihe die Fokusgeschwindigkeiten $5\ \mu\text{m/s}$, $20\ \mu\text{m/s}$ und $50\ \mu\text{m/s}$ benutzt. Der Fokus selber wird nur bis zu drei Viertel der Dicke des Diamanten von der Rückseite aus bewegt, damit keine Oberflächeneffekte, wie Krater, die Messung des Durchmessers der Säulen behindern. Die Reihen unterscheiden sich in der verwendeten Laserleistung von 50 mW, 80 mW und 120 mW.

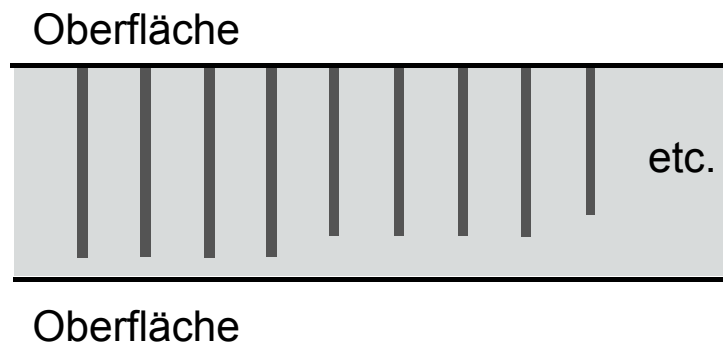


Abb. 3.3.: Skizze einer Säulenreihe eines 8×24 Blocks.

3.1.2. Versuchsaufbau

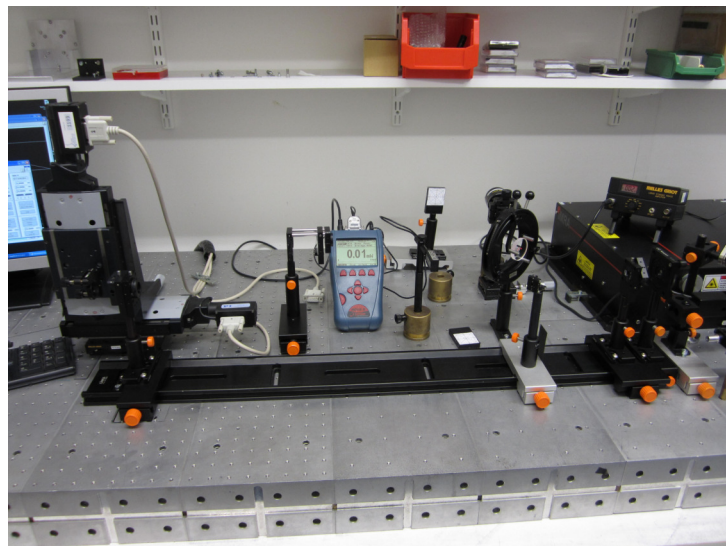


Abb. 3.4.: Photo des Versuchsaufbaus für die Graphitisierung des Diamanten. Vergleiche Abbildung 3.5 für eine Übersicht der verwendeten Materialien.

3. Experimentelle Vorgehensweise

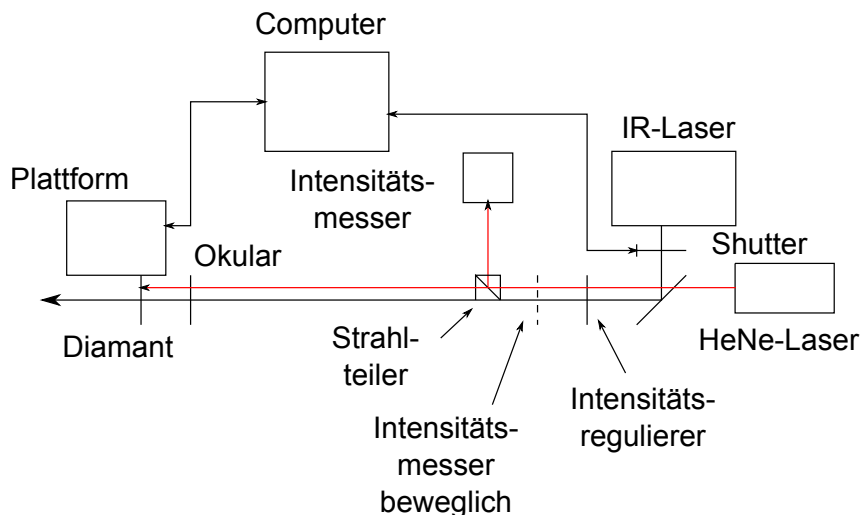


Abb. 3.5.: Skizze des Versuchsaufbaus für die Graphitisierung des Diamanten.

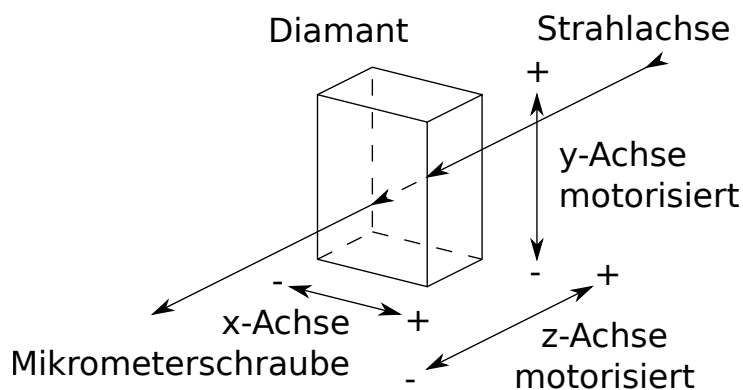


Abb. 3.6.: Skizze der Bewegungsrichtungen der Motoren an der Plattform.

In Abbildung 3.4 ist ein Photo des Versuchsaufbaus zur Graphitisierung des Diamanten zu sehen und in Abbildung 3.5 eine Skizze desselben zur besseren Verdeutlichung.

Verwendet wird ein Femtosekundenlaser mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1042 \text{ nm}$, einer Pulslänge von 290 fs und einer Wiederholfrequenz von 200 kHz, und ein HeNe-Laser. Die Laser werden mit Spiegeln so umgelenkt, dass sie parallel und beinahe deckungsgleich verlaufen. Somit kann der sichtbare rote Laser zur Justierung des Infrarotlasers verwendet werden. Im Folgenden wird der Aufbau beginnend bei den Lasern beschrieben.

Direkt vor dem Femtosekundenlaser befindet sich ein Shutter, sodass man das Laserlicht vom Computer gesteuert ein- und ausschalten kann, ohne den Laser selbst auszuschalten. Dann folgt ein Intensitätsregulierer aus Lambdaviertel Platten und Polarisatoren. Danach kann ein Intensitätsmessgerät mit mW Skalar in den Strahl gebracht werden, das aber nur zwischen den Graphitisierungen. Das letzte optische Element ist ein Okular, das das Laserlicht fokussiert. Hinter dem Okular wird der Diamant befestigt. Dazu gibt

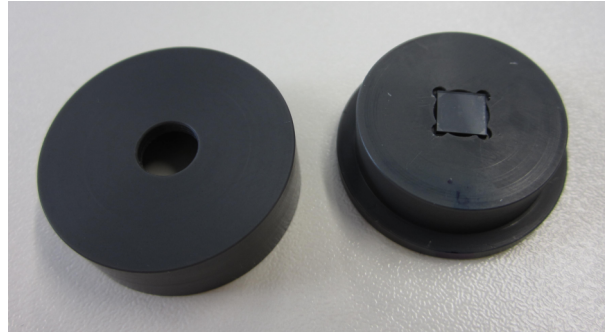


Abb. 3.7.: Halterung des Diamanten im Versuchsaufbau mit eingesetztem Diamanten.

es eine Plattform mit drei orthogonalen Ebenen, zwei davon motorisiert und eine mit einer Mikrometerschraube bewegbar. In Abbildung 3.6 sind die drei dazugehörigen Achsen x , y und z im Bezug zum Diamanten und der Strahlachse dargestellt. Parallel zum Strahl liegt die motorisierte z -Achse und die großen Oberflächen des Diamanten stehen senkrecht dazu. Die motorisierte y -Achse ist verantwortlich für die Bewegung auf und ab, senkrecht zum Tisch, und die x -Achse, mit der Mikrometerschraube bewegt, ist parallel zur Tischoberfläche. Die Befestigung des Diamanten ist ein Ring, der mit zwei Schrauben verkippt werden kann. In diesen wird die Halterung mit dem Diamanten gesetzt und mit einer Schraube leicht eingeklemmt. Die Halterung, siehe Abbildung 3.7, besteht aus zwei Teilen: Einem Hohlzylinder dessen Innenradius so groß ist, dass der Diamant in einer Aussparung aufgesetzt nicht durchfällt und nur mit den Ecken auf dem Zylinder aufliegt. Der zweite Teil ist ein Deckel, der um den Zylinder passt und ein gleiches Loch an der gleichen Stelle hat, sodass der Diamant festgehalten wird bei aufgesetztem Deckel. Das Loch wird benötigt, damit das Laserlicht auch zum Diamanten gelangen kann.

Der HeNe-Laser sendet sein Licht parallel in dieselbe Richtung wie der Femtosekundenlaser nach dem Intensitätsregulierer. Als einzige Erweiterung wird der Strahl mit einem Strahlteiler vor dem Okular geteilt, um die Intensität des Lasers nach der Reflexion am Diamanten an einem weiteren Messgerät beobachten zu können.

Zur Beobachtung der Oberfläche des Diamanten steht eine selbst gebaute Lupe zur Verfügung, dadurch muss der Diamant nicht ausgebaut werden um den Fortschritt des Versuchs zu kontrollieren. Sie kann vor das Okular gestellt werden, wenn nicht graphitisiert wird.

3.1.3. Durchführung

Justage

Für die Justierung des Diamanten wird der HeNe-Laser benutzt, auch Justagelaser genannt, da man den IR-Laser nicht sehen kann. Sie ist wichtig, weil im Diamanten Struk-

3. Experimentelle Vorgehensweise

turen im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ bis $50\ \mu\text{m}$ Abständen eingebracht werden sollen. Um dieses tun zu können, braucht man die gleichen Einstellungen über den gesamten verwendeten Bereich des Diamanten oder wenigsten nur geringe Abweichungen davon.

Zuerst werden die beiden Oberflächen des Diamanten bestimmt. Dazu wird der Diamant durch den Fokus des Lasers mit der z-Achse der Plattform strahlaufwärts bewegt. Die Intensität der Reflexion wird beobachtet und ist in Graph 3.8 dargestellt. Die Positionen der Oberflächen werden als die Positionen der Maxima der Verteilung identifiziert. Der Fehler der Ortsbestimmung wird danach auf $5\ \mu\text{m}$ abgeschätzt. Aus beiden Punkten ergibt sich die optische Dicke des Diamanten für den Justagelaser von $(210 \pm 7)\ \mu\text{m}$.

Vergleicht man die gemessene tatsächliche Dicke des Diamanten mit dieser optischen, erhält man für den Diamanten bei der Wellenlänge des HeNe-Lasers einen Brechungsindex von $n_{\text{HeNe}} = 2.46 \pm 0.08$. Dieser Wert stimmt mit dem Literaturwert, [10], von $n_{\text{Lit}} = 2.41$, der mit Gleichung (A.1) für die Wellenlänge $\lambda_{\text{HeNe}} = 632.816\ \text{nm}$ berechnet wird, überein. Für die Wellenlänge des Femtosekundenlasers erhält man einen Brechungsindex von $n = 2.39$. Das ist eine Abweichung von 1% auf den Wert des Justagelasers. Daraus kann man schließen, dass die Justierung mit dem HeNe-Laser auch sinnvoll für den Femtosekundenlaser ist.

Der Ort der Rückseite plus $50\ \mu\text{m}$ Verschiebung strahlaufwärts werden im Steuerungs-

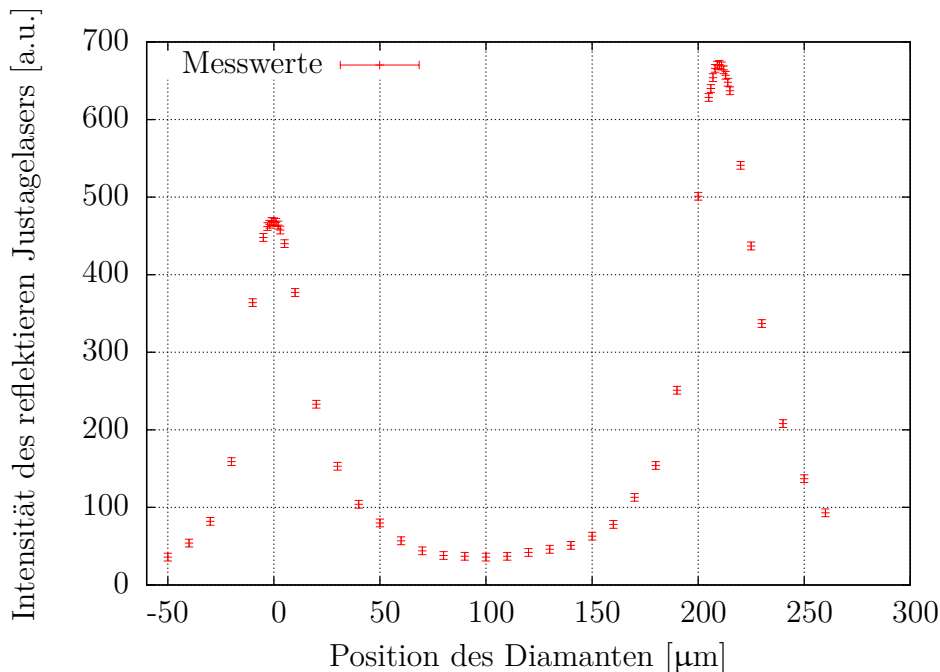


Abb. 3.8.: Intensitätsverlauf der Reflexion des HeNe-Lasers bei Bewegung des Diamanten in der z-Richtung.

programm als Nullposition festgelegt.

Nun wird noch die Oberfläche senkrecht zum Laserstrahl ausgerichtet. Dazu werden zwei Punkte festgelegt mit einem Abstand von 3 mm in der x-Richtung. An Punkt eins wird der Fokus auf die Oberfläche des Diamanten eingestellt. Dazu wird der Diamant auf der Strahlachse bewegt, bis ein Maximum der Intensität des Justagelasers erreicht wird. Dann wird Punkt zwei angefahren und dort wieder auf die Oberfläche fokussiert. Weicht die Position auf der z-Achse danach von der an Punkt eins ab, steht der Diamant schräg, d.h. nicht senkrecht zum Strahl. Diese Verkippung wird mit eigens dafür vorgesehenen Schrauben an der Befestigung des Diamanthalters an der Plattform ausgeglichen. Dieses Verfahren muss ein paar Mal angewandt werden, weil die Wirkung der Drehung an einer Schraube nicht dokumentiert ist. Die letztendliche Abweichung ist 2 μm über den Abstand der beiden Punkte.

Dasselbe Verfahren wird für zwei Punkte mit Abstand in der y-Richtung gemacht mit dem Ergebnis einer Abweichung von 3 μm auf 3.5 mm.

Während der Durchführung der Graphitisierung, siehe Abschnitt 3.1.3, wurde Dreck auf dem Diamanten bemerkt. Beim Versuch der Reinigung mit Luftdruck verrutschte der Diamant in der Halterung. Deswegen musste diese von der Plattform abgenommen werden und nach der Reinigung und Wiedereinsetzen des Diamanten musste die Justierung noch einmal durchgeführt werden. Dieses Mal mit einer Schräge von 1 μm auf jeweils denselben Strecken für die x- und y-Richtung.

Versuchsdurchführung

Anfangen in einer Ecke des Diamanten mit genug Abstand zum Rand werden die Elektroden erzeugt. Dies geschieht reihenweise, weil die motorisierte z-Achse für die Säulenerzeugung gebraucht wird und so nur noch eine motorisierte Achse übrig ist. Deshalb wird mit einem Computerprogramm erst die gewünschte Position in der Reihe angefahren und dann die Elektrode mit der z-Achse durch den Diamanten gezogen. Mit der Mikrometerschraube wird dann um einen Abstand weiter gedreht um die nächste Reihe zu beginnen. Für die Graphitisierungen sind fünf Computerprogramme geschrieben worden, die immer eine Reihe von Säulen erzeugen. Das erste erzeugt eine Reihe ohne Besonderheiten, das zweite produziert eine eingeschobene Reihe, das dritte eine Reihe mit verschiedenen Abständen des Fokus von der Rückseite, das vierte eine eingerückte Reihe mit verschiedenen Abständen des Fokus von der Vorderseite und das fünfte lässt eine Reihe mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, wie für die letzte Art von Block gewünscht, vgl. 3.1.1, entstehen. Die Reihen sind so programmiert, dass immer ein fester Abstand zwischen den

3. Experimentelle Vorgehensweise

Säulen ist. Will man eine Reihe mit anderem Abstand, muss man das vor Durchführung im Programm ändern. Konstant sind auch die Geschwindigkeiten mit denen die Motoren verfahren werden bei den ersten vier Programmen: Mit 0.5 mm/s werden die Positionen angefahren und mit 50 $\mu\text{m/s}$ der Fokus durch den Diamant bewegt. Beim fünften Programm variiert nur letztere Geschwindigkeit alle vier Säulen. Der Fahrweg des Fokus fängt 50 μm strahlabwärts der Rückseite an und hört 50 μm strahlauwärts der Vorderseite auf, jedenfalls für die Programme eins und zwei. Dies soll zur Sicherheit dienen, dass die Säulen auch durchgraphitisieren, da die bestimmte Dicke des Diamanten einen kleinen Fehler hat. Für die Programme drei und vier soll der Abstand von einer Oberfläche variiert werden, deswegen werden für diese Oberfläche die 50 μm weggelassen. Auch für das fünfte wird der Sicherheitsabstand von der Vorderseite nicht benötigt, weil die Säulen nur drei Viertel durch sein sollen.

Im Steuerungsprogramm der Motoren wird die y-Position der ersten Reihe und die z-Position 50 μm vor der Rückseite strahlabwärts als die allgemeine Startposition festgelegt. Um eine Reihe Säulen im Diamanten zu erzeugen, werden vier Schritte durchgeführt:

- Auswahl des richtigen Programms für die gewünschte Reihe.
- Einstellen der Startposition der Reihe: Dazu wird die gespeicherte Startposition in y- und z-Richtung mit dem Steuerungsprogramm angefahren und mit der Mikrometerschraube der Abstand zur letzten Reihe eingestellt.
- Einstellung der Laserleistung des Femtosekundenlasers mit dem Intensitätsregulierer.
- Starten des gewählten Programms.

Optional kann der Diamant mit der Lupe betrachtet werden.

Führt man abwechselnd jeweils zweimal das erste Programm und das zweite Programm durch bzw. viermal das dritte und das vierte jeweils nach Verstellen mit der Mikrometerschraube, erhält man die Blockstruktur wie in Abbildung 3.2 für die erste bzw. zweite Art von Block, die im Abschnitt 3.1.1 beschrieben sind.

Die Blöcke werden in Richtung der x-Achse untereinander angeordnet und zwar in folgender Reihenfolge:

1. Die 4×4 Blöcke angefangen mit denen mit 50 mW Laserleistung, dann die mit 80 mW und 120 mW, jeweils mit abnehmendem Abstand der Säulen.
2. Die 8×24 Blöcke mit der Reihenfolge 50 μm Abstand der Säulen vor 25 μm .

3. Der 3 mal 12 Block.

Für eine genauere Beschreibung der einzelnen Blöcke und deren Abstände von einander siehe Abschnitt 3.1.1.

Während der Vorbereitungen für den 4×4 Block mit 80 mW und 20 μm Abstand wurde Dreck auf dem Diamanten gesehen. Beim Versuch der Reinigung mit Druckluft verrutschte der Diamant in der Halterung. Deswegen wurde der Halter von der Plattform abgenommen, der Diamant herausgenommen, gereinigt und wieder eingesetzt. Nach dem Anbringen des Halters wurde die Justage wiederholt, siehe Abschnitt 3.1.3. Da die Position des Diamanten im Strahl in Richtung der x- und y-Achse nicht genau bestimmt werden konnte, sondern nur mit der Lupe, die nur nahe dem Strahl war, beobachtet werden konnte, wurde ein großzügiger Sicherheitsabstand zum letzten Block eingestellt.

3.2. Optische Spannungsmessung

3.2.1. Versuchsaufbau

Um die Graphitelektroden beobachten zu können, braucht man ein Mikroskop mit entsprechender Vergrößerung. Zwei stehen für die Versuche zur Verfügung:

Das erste ist ein Stereomikroskop mit 10-facher Objektivvergrößerung, Draufflicht und Durchlicht. Das Durchlicht wird durch eine Halogenlampe in einer externen Einheit realisiert. Dort kann auch die Helligkeit geregelt werden. Per Lichtleiter wird das Licht in das Mikroskop gebracht und noch von einer Linse fokussiert, die nur den grünen Anteil des ansonsten weißen Lichtes durchlässt. Eine Kamera ermöglicht die Aufnahme von Photos an einem Computer. Mit dem Programm speziell für diese Kamera kann die Farbe und Helligkeit bearbeitet werden.

Das zweite Mikroskop ist in einer *Probe Station* untergebracht. Im Folgenden ist mit Probe Station deswegen dieses Mikroskop gemeint. Es hat unter anderem ein Objektiv mit 20-facher Vergrößerung und lässt sich mit Motoren über einen Steuerknüppel verfahren. Es gibt ein Draufflicht aber kein Durchlicht. Zur Fixierung von Proben oder Messaufbauten kann ein Unterdruck an der Auflagefläche erzeugt werden. Auch an diesem Mikroskop ist eine Kamera installiert, die auf einem Computer live-Bilder zeigt und mit der Photos gemacht werden können.

Für die optische Spannungsmessung wird ein Aufbau mit zwei Polarisatoren benötigt und in dem der Diamant fest installiert ist. Dazu wird ein Halter, Abbildung 3.9 verwendet, der dem für die Graphitisierung nachempfunden ist, vergleiche Abschnitt 3.1.2.

3. Experimentelle Vorgehensweise



Abb. 3.9.: Bestandteile der optischen Spannungsmessung: Vorne die Halterung mit zwei linear Polarisatoren und eingesetztem Diamanten, hinten der Block mit eingelassenem Spiegel und Röhre für den Lichtleiter, links der Lichtleiter selber.

Die Einkerbung für den Diamanten ist die Gleiche, der Zylinder hat in der Mitte eine Gradskala mit 10° Schritten. Statt einem Deckel werden zwei verwendet, einer für die Oberseite und einer für die Unterseite. Sie haben nur einen schmalen Rand, auf den die Polarisationsfolien aufgeklebt sind, Daten der Folien in Tabelle 3.1. Der Deckel für die Unterseite hat zusätzlich noch einen Ring, damit die Polarisationsfolie nicht am Boden aufliegt. Am Rand der Deckel ist jeweils eine Markierung angebracht für die Ausrichtung der Folien. Wenn die Markierungen aufeinanderliegen, stehen die Polarisationsrichtungen senkrecht aufeinander.

Eigenschaft	Wert
Dicke	0.75 mm
Transmission einzelner	$\approx 44\%$
Transmission zwei parallel	$\approx 39\%$
Transmission zwei gekreuzt	$> 99\%$

Tab. 3.1.: Eigenschaften der Polarisationsfolien „TechSpec® linearer Polarisationsfilm mit hohem Kontrast“ laut Hersteller [11].

Mit dem Stereomikroskop und dem Halter kann bei Durchlicht die Messung der Spannung gemacht werden. Um aber an den Säulen genauer beobachten zu können, muss die Probe Station verwendet werden. Dazu wird die Quelle des Durchlichts und der Lichtleiter des anderen Mikroskops benötigt, um an der Probe Station Durchlicht zu installieren. Da aber unter dem Objektiv nicht viel Platz ist, ungefähr 5 cm, wird das Licht aus dem liegenden Lichtleiter über einen Spiegel nach oben in das Mikroskop gelenkt. Der Spiegel selber ist in einem Block eingelassen, der eine Öffnung passend für den Lichtleiter hat, Abbildung 3.9.

In der Oberfläche des Blocks ist eine Einkerbung, die zu dem Ring an der Unterseite des Halters passt. Wird der Halter dort hinein gestellt, kann er nur wenig verrutschen.

Da die Intensität des Lichtes zu hoch ist, um auf der Kamera etwas sehen zu können, wird in die Öffnung des Blocks ein 4 cm langes Rohr gesteckt. In der dem Spiegel zugewandten Seite ist eine Blende mit halbem Radius des Lichtleiters angebracht zur Reduzierung der Intensität.

Der Aufbau in der Probe Station besteht somit aus dem Spiegel mit Lichtleiter, darüber der Halter mit dem Diamanten und dann dem Mikroskop.

3.2.2. Messung

Mit dem Stereomikroskop werden zuerst ein paar Bilder von den Säulen ohne Polarisatoren gemacht. Um nicht nur die Oberfläche zu betrachten sondern auch den Verlauf der Säulen im Diamant wird selbiger gekippt betrachtet.

Mit der Probe Station werden die Bilder mit den Polarisatoren gemacht. Von jedem Block Säulen wir ein Bild mit gekreuzten und eins mit parallelen Polarisatoren gemacht jeweils von der Vorderseite und der Rückseite. Der Fokus des Mikroskops ist dabei nahe unter der Oberfläche, weil an der Oberfläche Krater bei der Graphitisierung entstehen und die Spannung nicht an diesen sondern nur an den Säulen selbst gemessen werden soll.

Bei 20-facher Objektivvergrößerung passt ein 4×4 Block mit einem Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$ auf das Bild. Für die größeren Blöcke werden deswegen mehrere Bilder gebraucht, um alle Säulen zu photographieren.

Ein wichtiger Punkt bei der Aufnahme der Bilder ist, dass die mit gekreuzten und parallelen Polarisatoren von einem Block deckungsgleich sind, damit sie in der Auswertung ohne Probleme übereinandergelegt werden können, siehe Abschnitt 4.2. Korrigiert werden können Verschiebungen, aber Drehungen des Diamanten bei der Verstellung des Polarisators um 90° können nicht verarbeitet werden.

4. Ergebnisse

4.1. Graphitisierung des Diamanten

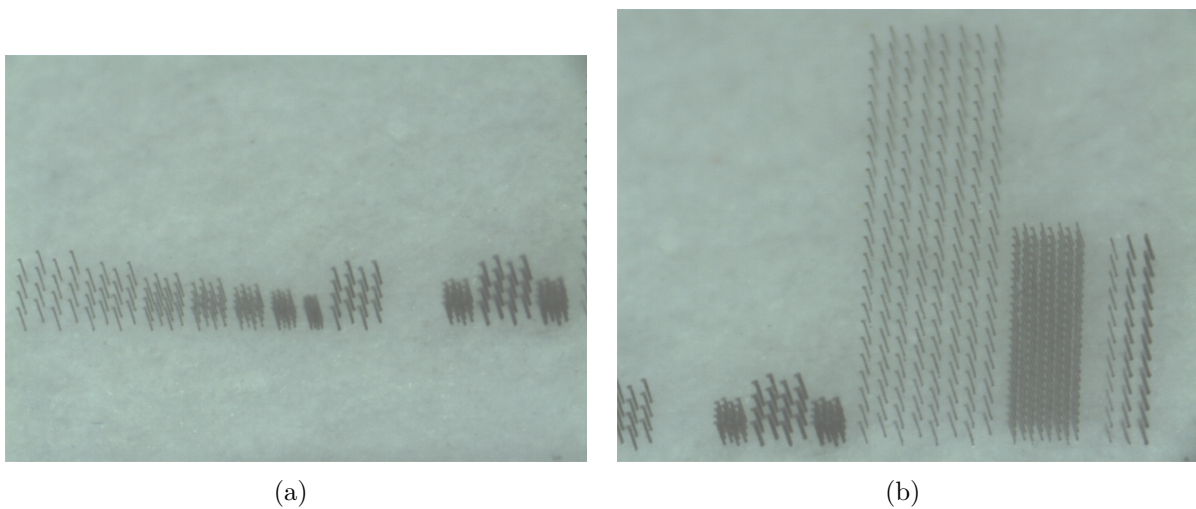


Abb. 4.1.: Übersichtsbilder aller Säulen aufgenommen mit dem Stereomikroskop. Der Diamant ist um 40° gekippt, damit die Säulen sichtbar sind. In Bild (b) links die letzten drei Blöcke von (a).

In dem Diamanten sind mit den Parametern aus Abschnitt 3.1.1 insgesamt 596 Säulen erzeugt worden. Zwei Übersichtsbilder sind in Abbildung 4.1 zu finden. Sie sind mit dem Stereomikroskop aufgenommen worden. Darauf sieht man die gesamten Säulen sowohl in der Anzahl als auch in der Länge der einzelnen Säulen, da der Diamant um 40° gekippt ist. Von links nach rechts über die Bilder und von unten im Bild nach oben ist die Reihenfolge der Graphitisierung. Im linken Bild 4.1(a) sind die Säulen des ersten Parametersatzes mit den 4×4 Blöcken. Die ersten drei Blöcke im rechten Bild 4.1(b) sind die letzten Blöcke aus dem linken Bild. Rechts davon sind die großen Blöcke des zweiten Parametersatzes und ganz rechts der Block des dritten. Insgesamt hat jeder gewählte Parameter zur Graphitisierung geführt, wenn auch nicht immer mit dem gewünschtem Ergebnis, z. B. sind von dem zweiten Parametersatz die meisten Säulen bis an die Oberfläche durchgraphitisiert, obwohl der Laserstrahl abgeschaltet wurde, als der Fokus noch im Diamant war.

4. Ergebnisse

Auch zu erkennen in der Abbildung 4.1 ist, dass die Säulen eine Verdickung an der Oberfläche haben und damit wie ein Nagel aussehen.

Da diese Phänomene nicht Hauptteil dieser Arbeit sind, werden sie hier nur erwähnt und nicht weiter im Detail analysiert.

4.2. Analysemethode zur optischen Spannungsmessung

Mit der Probe Station wurden insgesamt 120 Bilder aufgezeichnet, davon jeweils die Hälfte mit gekreuzten und parallelen Polarisatoren. Außerdem ist die eine Hälfte der Bilder von der Rückseite und die andere von der Vorderseite des Diamanten. Wie schon in der Durchführung Abschnitt 3.2.2 erwähnt sind die 8×24 Blöcke zu groß um auf ein Bild zu passen. Deswegen wurden jeweils mehrere Bilder gemacht, die sich mit einer Säulenspalte überlappen. Für den Block mit $50 \mu\text{m}$ Säulenabstand passen sechs Säulen einer Reihe und vier Reihen auf ein Bild, für den mit $25 \mu\text{m}$ Säulenabstand alle acht Reihen mit elf Säulen. Deswegen werden die Bilder auch nach den enthaltenen Säulen benannt. In den Bildern mit $50 \mu\text{m}$ Säulenabstand ist effektiv eine fünfte Reihe mit drauf, aber so dass nicht genug Umgebung der Säulen vorhanden ist. Darum fällt sie in der Benennung der Bilder weg. Die Nummerierung der Säulen erfolgt wie bei einer Matrix nach Reihe und Spalte in der Reihenfolge in der sie produziert wurden. Aufgepasst werden muss mit der Unterscheidung in Bild von der Vorderseite und von der Rückseite durch die Drehung des Diamanten: Für die Vorderseite ist die erste Säule eines Blocks (die Säule (1,1)) unten rechts im Bild und für die Rückseite oben rechts. Bei den Bildern der 4×4 Blöcke liegt der Block in der Mitte des Bildes und die Angabe unten bzw. oben ist relativ auf den Block zu sehen. Im Mikroskop selber sind Verunreinigungen vorhanden, deswegen sind in allen Bildern ein paar zusätzliche Kreisstrukturen zu sehen.

4.2.1. Verarbeitung der Bilder durch Quotientenbildung von Grauwerten

Da die Bilder alle im BMP-Format vorliegen, können sie mit einem selbstgeschriebenen C++ Programm¹ verarbeitet werden.

Der erste Schritt dazu ist aus den Grauwerte, insgesamt 256 Stufen, eines Bildes mit gekreuzten Polarisatoren I_{\perp} und eines mit parallelen I_{\parallel} derselben Stelle nach der folgenden

¹mit dem Packet *EasyBMP* von P. Macklin

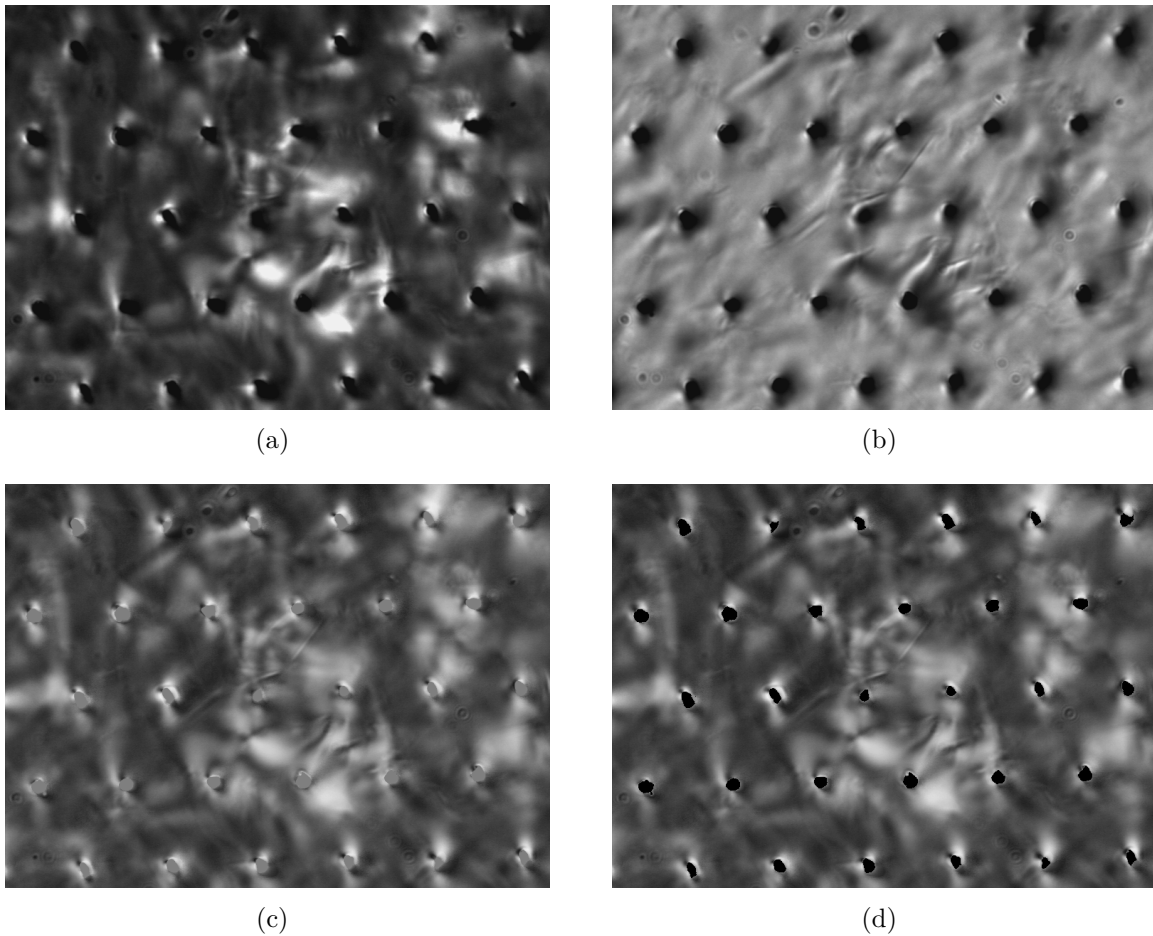


Abb. 4.2.: Verarbeitungsmethode der Bilder mit Polarisatoren: Bilder (a) und (b) derselben Stelle mit gekreuzten bzw. parallelen Polarisatoren werden mit Gleichung (4.1) übereinandergelegt zu Bild (c). In Bild (d) sind die Säulen schwarz markiert. Hier gezeigt die ersten Säulen des 8×24 Block mit $50 \mu\text{m}$ Abstand.

Formel einen Quotienten Q zu bilden:

$$Q = \frac{I_{\perp}}{I_{\perp} + I_{\parallel}}. \quad (4.1)$$

Dadurch werden die hellen Stellen in den Bildern mit gekreuzten Polarisatoren, also diejenigen bei denen es eine Phasenverschiebung des Lichtes durch Spannung im Diamanten gibt, gewichtet. Der Quotient wird hochskaliert auf 256 Grauwerte in einem eigenen Bild gespeichert. Da an den Säulen fast kein Licht durchgelassen wird, ist die Summe im Nenner klein und somit der Quotient groß. Um dieses Verhalten abzufangen, wird bei einer empirisch ermittelten Summe kleiner als 31 und 80 für die Vorderseite bzw. die Rückseite der Quotient auf null gesetzt. In Abbildung 4.2 sind als Beispiel die vier Bilder dieses

4. Ergebnisse

Prozesses für die Säulen (1,1) - (4,6) des 8×24 Blockes mit Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$ von der Rückseite dargestellt. Der Vergleich der letzten beiden Bilder 4.2(c) und 4.2(d) zeigt, dass nur die Säulen durch das Abfangen markiert werden.

Ein Problem bei dieser Methode liegt in der Formulierung „derselben Stelle“. Da die verwendeten Bilder nicht pixelgenau deckungsgleich sind, muss jeder Verarbeitungsprozess individuell modifiziert werden, indem die Bilder gegeneinander verschoben werden. Dies musste bis auf einzelne Pixel genau geschehen, weil bei der Bildung des Quotienten sonst an den Säulen sichtbare, gegenüberliegende helle bzw. dunkle Stellen erscheinen. In Abbildung 4.3 ist ein extremes Beispiel eines unverschobenen und des letztendlichen Bildes des Quotienten zu finden. Extrem meint in diesem Fall, dass die Abweichung sehr groß mit 32 Pixel in der einen Richtung anstatt der sonst gewöhnlichen zwei bis zehn Pixel ist.

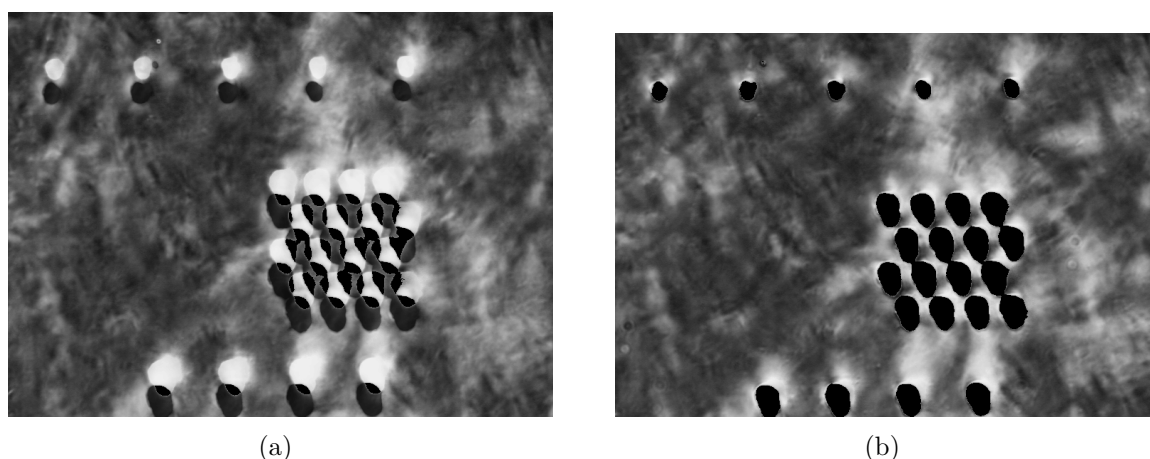


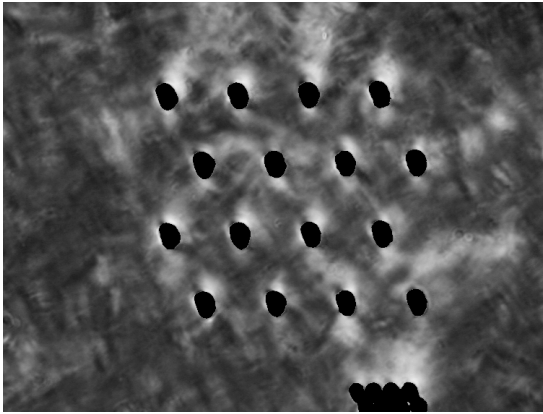
Abb. 4.3.: In Bild (a) ist die einfache Quotientenbildung ohne Verschiebung der Bilder gegeneinander und in Bild (b) mit Verschiebung zu sehen. Dies am Beispiel des 4×4 Blocks mit Säulenabstand von $20 \mu\text{m}$ und Laserleistung von 120 mW .

4.3. Beobachtungen anhand der Bilder des Quotienten

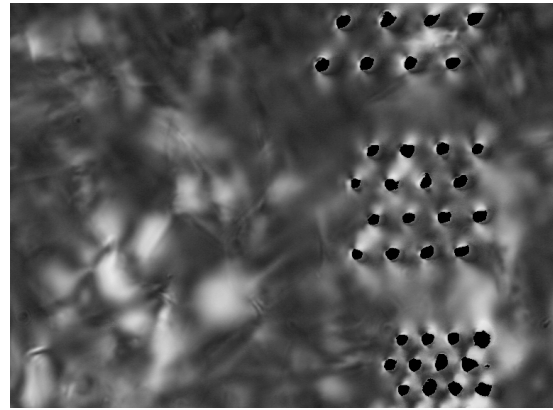
Die erste Beobachtung ist, dass mit dem 4×4 Block mit Säulenabstand von $10 \mu\text{m}$ keine Auswertung möglich ist, weil die Säulen zu dicht beieinanderstehen, als dass genügend Licht durch die Zwischenräume kommt, auch wenn die Auflösung des Mikroskops ausreicht, um diese Strukturen aufzulösen, siehe Abbildung B.1 im Anhang.

Bei den anderen Bildern können helle und dunklere Bereiche, also mechanische Spannung, in den Bildern des Quotienten beobachtet werden. Als Beispiel hier in der Abbildung 4.4

4.3. Beobachtungen anhand der Bilder des Quotienten



(a) Quotient des 4×4 Blocks mit Säulenabstand $40 \mu\text{m}$ und Laserleistung 80 mW von der Vorderseite.



(b) Quotient des 4×4 Blocks mit Säulenabstand $20 \mu\text{m}$ und Laserleistung 50 mW von der Rückseite, mittig im Bild.

Abb. 4.4.: Unterschiedliche Beobachtungen von mechanischer Spannung bei verschiedenen Säulenabständen und Laserleistungen.

die Bilder der 4×4 Blöcke mit Säulenabstand $40 \mu\text{m}$ und Laserleistung 80 mW der Vorderseite (Bild 4.4(a)) bzw. mit Säulenabstand $20 \mu\text{m}$ und Laserleistung 50 mW der Rückseite (Bild 4.4(b)). Weitere Bilder sind im Anhang B zu finden. Deutlich sind in beiden Bildern die hellen Stellen um die Säulen zu sehen. Bei niedrigerem Säulenabstand verbinden sich einige dieser Bereiche zwischen den Säulen.

Mit höherer Laserintensität dehnen sich die hellen Bereiche um die Säulen weiter aus.

Neben den Blöcken kann man die Einflüsse des polykristallinen Diamanten beobachten. Viele Stellen sind hell in Bereichen ohne Säulen und weisen auf Spannungen an Korngrenzen hin.

Betrachtet man alle Bilder sind keine qualitativen Unterschiede zwischen der Vorderseite und der Rückseite des Diamanten zu beobachten.

Isoklinen oder Isochromaten wie in der Theorie 2.3 beschrieben, treten in den Bildern nicht auf, besonders in den direkten Aufnahmen. Ein Beispiel, wo das auch der Fall ist, ist Plexiglas, das keine Spannung in sich hat [9]. Für diesen Diamanten beobachtet man, wie erwähnt, Spannung im Material ohne Säulen. Entweder ist die Spannung nur auf diese Stellen begrenzt und der restliche Diamant frei davon, sodass keine Isoklinen und Isochromaten auftreten, oder die Strukturen sind so klein, dass diese Effekte nicht beobachtet werden können.

Die wichtigste Beobachtung ist, dass keine Brüche oder Risse im Diamanten entstanden sind. Da der Laser eine Wiederholfrequenz von 200 kHz hat, werden die Säulen 200 mal langsamer gezogen, als von anderen Gruppen, die nur eine Frequenz von 1 kHz benutzen [12]. Deswegen können unsere Ergebnisse in der Abbildung 2.4 über die aufgetretenen

4. Ergebnisse

Brüche im linken Bereich unter der Trennlinie eingeordnet werden.

Um nicht nur bei den augenscheinlichen Beobachtungen zu bleiben, werden im nächsten Abschnitt die Grauwerte in Zahlen betrachtet.

4.4. Werte für den Quotienten

In diesem Abschnitt werden Werte für den Quotienten und somit ein Maß für die Spannung berechnet. Zuerst wird dazu der Untergrund des Diamanten selber ausgerechnet, Abschnitt 4.4.1, dann Profillinien durch Säulen gelegt, Abschnitt 4.4.2, und in den letzten beiden Abschnitten 4.4.3 und 4.4.4 werden Ausschnitte mit sechs bzw. zwölf Säulen betrachtet.

Da Werte eines Quotienten betrachtet werden, sind alle Angaben in Prozent und nicht den gewohnten 256 Stufen der Bilder. Wenn Mittelwerte berechnet werden, ergibt sich der Fehler aus der Standardabweichung, die im Folgenden auch Schwankung genannt wird. Der Fehler eines Mittelwertes aus Mittelwerten berücksichtigt die Fehler der einzelnen Mittelwerte und die Standardabweichung des neuen Mittelwerts.

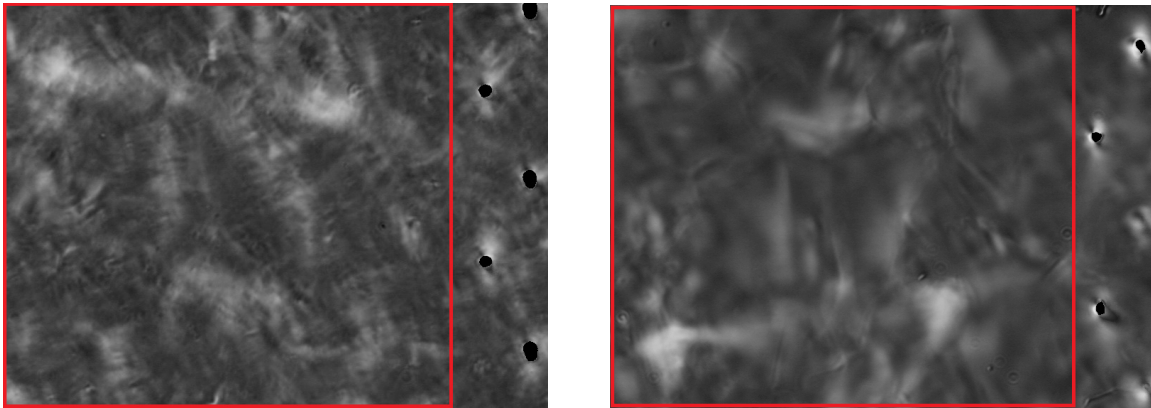
4.4.1. Untergrund des Diamanten

Zur Betrachtung des Untergrunds werden Bilder des Quotienten mit einem großen freien Bereich des Diamant mit der letzten Säulenspalte der 8×24 Blöcke als Orientierung verwendet, siehe Abbildung 4.5 und B.2. Der Bereich um die Säulen wird großräumig ausgespart und vom Freien der Mittelwert und die Standardabweichung der Grauwerte berechnet. Aus jeweils zwei solcher Bilder der Vorderseite und der Rückseite erhält man den Mittelwert für den Untergrund, Tabelle 4.1. Trotz einer großen Breite der Grauwerte

	Vorderseite	Rückseite
Untergrund [%]	30.4 ± 0.4	29.7 ± 1.8
Schwankung [%]	7	6

Tab. 4.1.: Werte des Quotienten für den Untergrund der Vorderseite und der Rückseite des Diamanten. Die Schwankung gibt dessen Standardabweichung an.

des Untergrunds ist der Fehler durch die hohe Anzahl von ungefähr 370000 Pixeln klein. Die Schwankung ist gerade durch diese Breite vergleichsweise groß, weil in den gewählten Bereichen auch die Spannungsspitzen durch den Polykristall mit einberechnet sind. In den verwendeten Bildern sieht man solche Strukturen, die recht unterschiedlich sind. Ein paar erstrecken sich über die Hälfte des Bildes und andere sind nur recht klein.



(a) Vorderseite.

(b) Rückseite.

Abb. 4.5.: Für die Untergrundberechnung verwendete Bilder, eingezeichnet die benutzten Gebiete neben den letzten Säulen des 8×24 Blocks mit Säulenabstand $50 \mu\text{m}$.

In den folgenden Auswertungen wird der jeweilige Untergrund in den Graphen mit einer blauen Linie und der Schwankungs- oder Fehlerbereich mit zwei grünen Linien dargestellt.

4.4.2. Profillinien

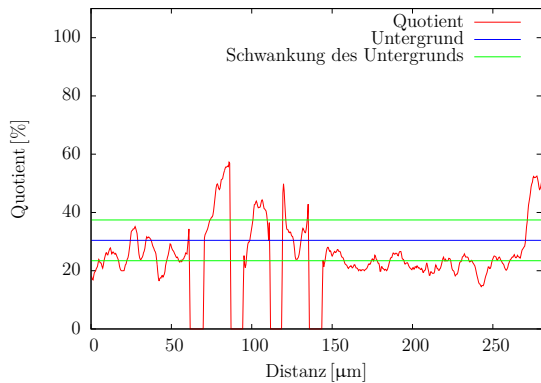
Um zu zeigen, dass die hellen Stellen nicht auf überhöhtem Untergrund im Bereich der Säulen beruhen, werden Profillinien durch die Säulen gezogen. In Abbildung 4.6 sind zwei solcher Linien, die bis in den freien Bereich des Diamanten reichen, dargestellt. Die verwendeten Säulen sind die der Reihe 3 des 4×4 Blockes mit Säulenabstand von $25 \mu\text{m}$ der Vorderseite (Abbildung 4.6(a)) bzw. die der Reihe 2 des 4×4 Blockes mit Säulenabstand von $15 \mu\text{m}$ der Rückseite (Abbildung 4.6(b)).

Zu sehen ist in beiden Bildern eine Erhöhung des Quotienten an den Säulen, die auch zwischen ihnen nicht konstant ist, aber meist auch höher als der Untergrund ist. Im rechten Bild ist der Quotient an den Säulen um mindesten 10 Prozentpunkte über der oberen Grenze der Schwankung des Untergrunds. Eindeutig ist also, dass es Spannung an den Säulen gibt. Die Werte an den einzelnen Säulen variieren aber untereinander.

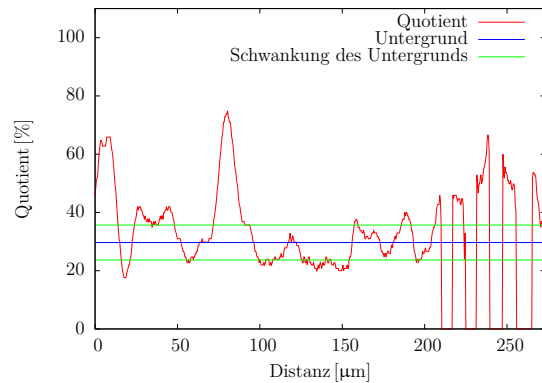
Im freien Bereich liegt der Wert meist unter dem Wert des Untergrunds aber noch in dessen Schwankungsbereich. Es gibt auch Stellen mit sogar höheren Werten als an den Säulen. Diese gleichen den Unterschied zum Untergrund wieder aus, da dieser selber mit solchen Fluktuationen berechnet wird.

Nun werden Linien nicht nur durch eine Reihe, sondern schräg durch einen Block betrachtet. In Abbildung 4.7 sind drei Graphen mit den Richtungen der Linien gerade durch eine

4. Ergebnisse



(a) Profillinie durch die Säulenreihe 3 des 4×4 Blocks mit Säulenabstand von $25 \mu\text{m}$ und Laserleistung 50 mW in den freien Bereich des Diamanten hinein. Säulen links im Graphen.



(b) Profillinie durch die Säulenreihe 2 des 4×4 Blocks mit Säulenabstand von $15 \mu\text{m}$ und Laserleistung 50 mW in den freien Bereich des Diamanten hinein. Säulen rechts im Graphen.

Abb. 4.6.: Profillinien zweier Blöcke, (a) von der Vorderseite, (b) von der Rückseite des Diamanten, die auch in den ungenutzten Bereich des Diamanten gehen.

Reihe (Abbildung 4.7(a)), schräg nach links oben (Abbildung 4.7(b)) und schräg nach rechts oben (Abbildung 4.7(c)) dargestellt. Der verwendete Block ist der 4×4 mit Säulenabstand von $40 \mu\text{m}$ und Laserleistung von 80 mW . Es liegen jeweils vier Säulen auf den Linien, welche das sind, kann den Bildunterschriften entnommen werden. Im vierten Bild 4.7(d) der Abbildung ist zum Vergleich der Block selber dargestellt.

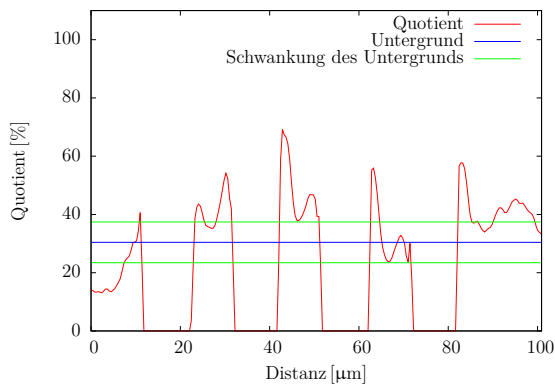
Vergleicht man die Profillinien, ist offensichtlich, dass es eine Richtung gibt, in der die Helligkeit und somit die Spannung mindestens 30% höher ist gegenüber den anderen nämlich die Richtung nach oben rechts. Zwischen den Säulen variiert der Quotient in dieser Richtung nicht so stark und verhält sich eher linear als in der geraden Richtung in Abbildung 4.7(a). Dort gibt es Minima zwischen den Säulen.

Die dritte Säule ist die gleiche für alle Linien, aber die Spannung um sie hat in den verschiedenen Richtungen ganz andere Profile. Dies zeigt besonders, dass die Spannung an den Säulen nicht isotrop ist.

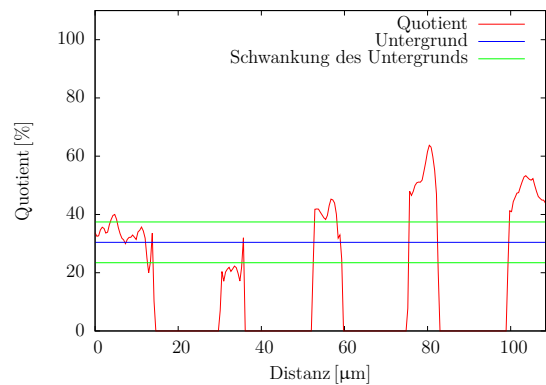
Eine Ursache könnten nicht gleichmäßig geformte Säulen sein, deren Inhomogenitäten an speziellen Stellen mehr Spannung verursachen. Eine andere könnte in der Nähe der Säulen liegen, dass bei der Graphitisierung die bestehenden Säulen Einfluss auf die neue haben. Für diesen Block ist der letzte Ansatz mit Sicherheit ein Teil der Erklärung, weil die Säulen mit $20 \mu\text{m}$ Abstand sehr dicht stehen und mit einer höheren Laserintensität produziert wurden, sodass die Säulen zusätzlich dicker sind.

Ob es sich bei der hier auftretenden Vorzugsrichtung um eine allgemeine Richtung für diesen Diamanten handelt, ist nicht untersucht worden, weil die auftretenden Effekte wie

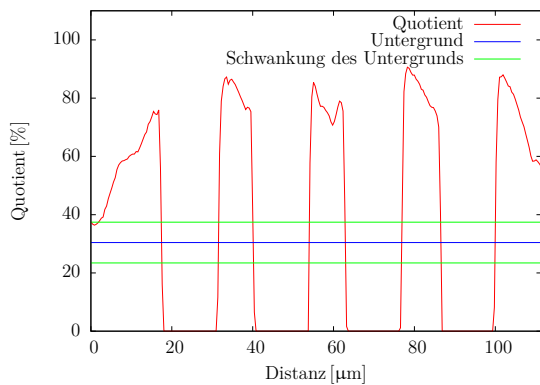
4.4. Werte für den Quotienten



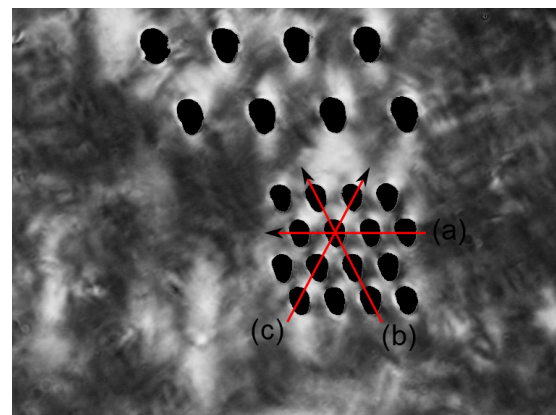
(a) Profillinie durch die Säulenreihe 3. Links die erste Säule der Reihe.



(b) Profillinie durch die Säulen (1,2)-(4,3). Links die erste Säule der Reihe.



(c) Profillinie durch die Säulen (1,4)-(4,2). Links die erste Säule der Reihe.



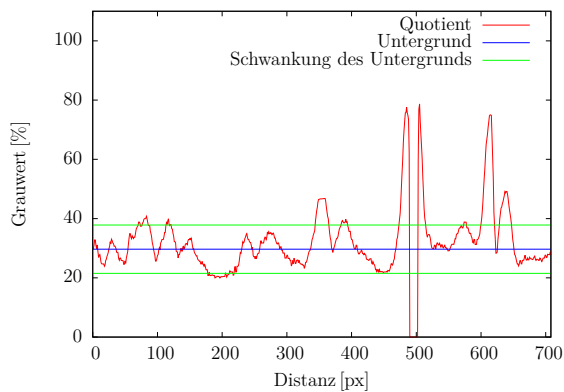
(d) Bild des Quotienten aus dem die Profillinien sind.

Abb. 4.7.: Profillinien des 4×4 Blocks mit Säulenabstand von $20 \mu\text{m}$ und Laserleistung 80 mW von der Vorderseite und der Block selber mit eingezeichneten Richtungen der Linien.

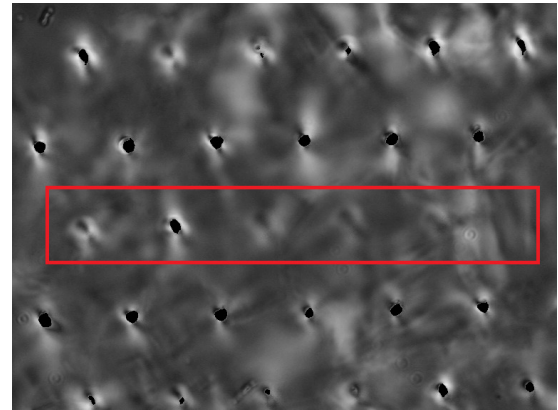
Gitteranordnung, Einfluss der Reihenfolge der Graphitisierung, andere Effekte und deren Wechselwirkung nicht untersucht sind. Im einfachsten Fall ist die Vorzugsrichtung eine Auswirkung einer ungleichmäßigen Lichtquelle. Diesen Effekt könnte man leicht durch Drehung des Halters mit dem Diamanten relativ zur Lichtquelle aufdecken. Aber es könnte auch sein, dass der Diamant trotz genauer Justierung leicht schief stand, sodass auch die Säulen nicht senkrecht auf der Oberfläche stehen, wodurch auch eine Vorzugsrichtung entstehen könnte.

An dieser Stelle soll noch ein Effekt der gewählten Parameter für den zweiten Parametersatz erwähnt und an der Abbildung 4.8 veranschaulicht werden, weil er einen Einfluss auf die folgende Auswertung hat. In der Abbildung ist eine Profillinie durch die Säulen

4. Ergebnisse



(a) Profillinie durch die dritte Säulenreihe. Links die erste Säule.



(b) Bild des Quotienten, im Kasten die Reihe der Profillinie.

Abb. 4.8.: Veranschaulichung von Säulen, die nicht bis zur Oberfläche der Rückseite durchgedrungen sind am 8×24 Block mit Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$ und Laserleistung 50 mW mit einem Ausschnitt von Säule (1,19) bis (4,24).

19-24 der dritten Reihe des 8×24 Blocks mit $50 \mu\text{m}$ Säulenabstand und das zugehörige Bild der Linie zu sehen.

Für die Graphitisierung der beiden großen Blöcke war der Abstand des Fokus von der Oberfläche im Verlauf einer Reihe immer größer gewählt worden, siehe Abbildung 3.3 für eine Skizze. Erwartet war, dass ab einem gewissen Abstand die Säulen nicht mehr bis zur Oberfläche durchkommen. An der Vorderseite sind alle Säulen durch und an der Rückseite ungefähr 20% nicht durch, aber ohne klare Grenze in Abhängigkeit der Fokusposition. Unter einem Fokusabstand von $48 \mu\text{m}$ von der Oberfläche, was $20 \mu\text{m}$ Fahrweg für den Motor im Versuchsaufbau wegen des Brechungsindex des Diamanten entspricht, gibt es nur durchgraphitisierte Säulen. Mit diesem Abstand gibt es nur wenige, die nicht an der Oberfläche sind und mit $60 \mu\text{m}$ ungefähr genauso viele wie mit $72 \mu\text{m}$.

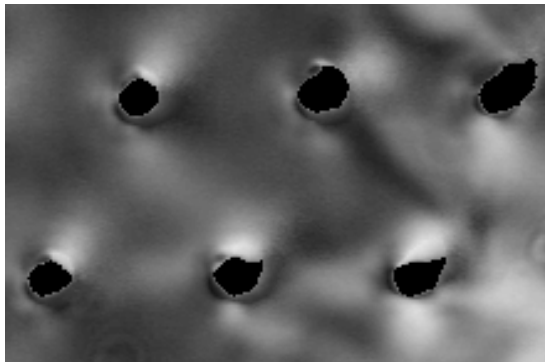
In der Abbildung sieht man solche fehlenden Säulen, und die Profillinie zeigt, dass an den Stellen bis auf einer keine erhöhte Helligkeit, sprich Spannung, auftritt. Dies ist zu beachten für den übernächsten Abschnitt 4.4.4.

4.4.3. Mittelwerte des Quotienten in Ausschnitten mit sechs Säulen

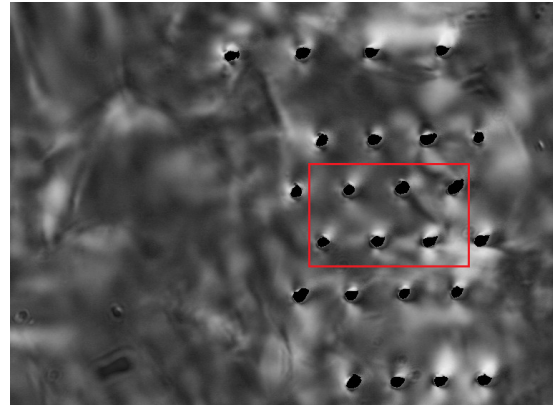
In diesem und dem nächsten Abschnitt soll ermittelt werden, wie hoch die Spannung in einem Gebiet ist. Um dafür eine Norm für die unterschiedlichen Abstände der Säulen zu haben, werden Gebiete mit fester Säulenanzahl gewählt, in diesem Abschnitt sechs. Diese Zahl begründet sich mit der maximalen Anzahl der Säulen, die noch von fünf anderen

Säulen umgeben sind für die 4×4 Blöcke, damit nur Effekte in der Gitteranordnung und nicht am Rand des Gitters mit berücksichtigt werden. Für diese Blöcke sind das also die ersten drei Säulen der zweiten Reihe und die letzten drei der dritten. Ein Beispiel Originalbild und Ausschnitt ist in Abbildung 4.9 zu finden.

Für alle 4×4 Blöcke der Vorder- und der Rückseite werden diese Ausschnitte gemacht und

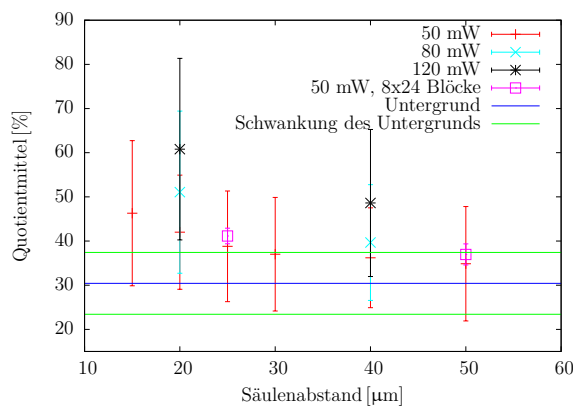


(a) Ausschnitt von sechs Säulen, die innerhalb der Gitteranordnung liegen, vergrößert.

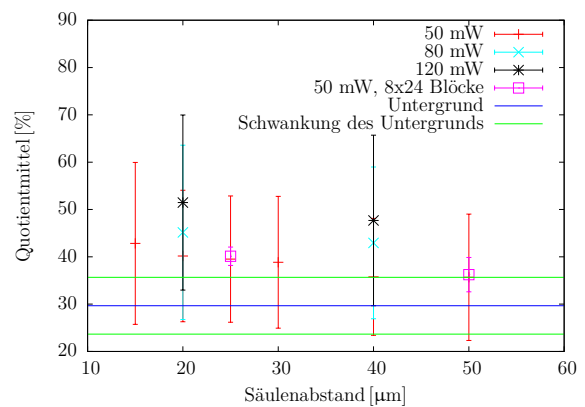


(b) Originalbild des Ausschnitts.

Abb. 4.9.: Beispiel der Rückseite für einen Ausschnitt bei der Mittelwertbildung über Gebiete mit sechs Säulen: 4×4 Block mit $30 \mu\text{m}$ Säulenabstand und 50 mW Laserleistung.



(a) Vorderseite.



(b) Rückseite.

Abb. 4.10.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent mit Schwankung für den Ausschnitt von sechs Säulen aus den verschiedenen Blöcken mit 4×4 Säulen und zum Vergleich zwei Werte mit Mittelwertfehler der größeren Blöcke.

dabei der Mittelwert der Grauwerte berechnet. Dabei werden die Säule nicht mit einbezogen, da sie kein Licht durchlassen. Diese Mittelwerte sind in Abbildung 4.10 getrennt für

4. Ergebnisse

Vorder- und Rückseite in Abhängigkeit des Säulenabstandes und nach der Laserleistung aufgeschlüsselt aufgetragen. Die Fehlerbalken geben die Schwankung der Mittelwerte an. Diese Darstellungsform ist gewählt worden, um sensitiv auf die Homogenität der Spannung in den Ausschnitten zu sein. In Abbildung A.1 im Anhang A.3 sind die gleichen Graphen mit den Fehlern der Mittelwerte dargestellt.

Zusätzlich wird für die ersten Säulen der großen Blöcke dasselbe mit mehreren Ausschnitten wegen der höheren Anzahl der Säulen pro Bild gemacht und die Mittelwerte der Ausschnitte (siehe Abbildungen A.2 und A.3) in die Graphen eingetragen. Für diese wird der Fehler angegeben, weil die Fortpflanzung der Fehler der einzelnen Mittelwerte mitberechnet wird.

Zwei Abhängigkeiten des Mittelwertes in einem Gebiet fallen auf: Mit steigendem Säulenabstand bei konstanter Laserleistung sinkt die mittlere Spannung und mit zunehmender Laserleistung und konstantem Säulenabstand steigt sie. Für große Abstände und kleine Leistungen nähert sich der mittlere Quotient dem Wert des Untergrunds. Diese Verhalten erwartet man, da für höhere Leistungen dickere Säulen entstehen [8] und mit geringerem Abstand die Verzerrung des Gitters um eine Säule noch bis zur nächsten reichen kann.

Die Mittelwerte aus den größeren Blöcken bestätigen, dass die gewählten sechs Säulen als innerhalb eines Gitters betrachtet werden können für die beiden Abstände $50\ \mu\text{m}$ und $25\ \mu\text{m}$ bei einer Laserintensität von $50\ \text{mW}$. Dies folgt, weil die betrachteten Säulen innerhalb der Gitteranordnung liegen und die Werte mit denen der 4×4 Blöcke übereinstimmen.

Vergleicht man die Vorderseite mit der Rückseite, fällt auf, dass für kleine Abstände von $20\ \mu\text{m}$ die Spannung für die Intensitäten von $120\ \text{mW}$ und $80\ \text{mW}$ auf der Vorderseite um 10 bzw. 5 Prozentpunkte höher ist als auf der Rückseite. Für Abstände von $40\ \mu\text{m}$ ist der Wert für $120\ \text{mW}$ gleich und für $80\ \text{mW}$ der der Rückseite um 3 Prozentpunkte höher. Dieser Effekt kann an der Kraterbildung oder den größeren Säulendurchmessern an der laserzugewandten Seite der Vorderseite liegen. Dadurch wird mehr Diamantmaterial deformiert als an der Rückseite, wo nach erfolgter Graphitisierung keine Verbreiterung erfolgt, weil das Graphit in dieser Richtung nicht transparent für den Laser ist.

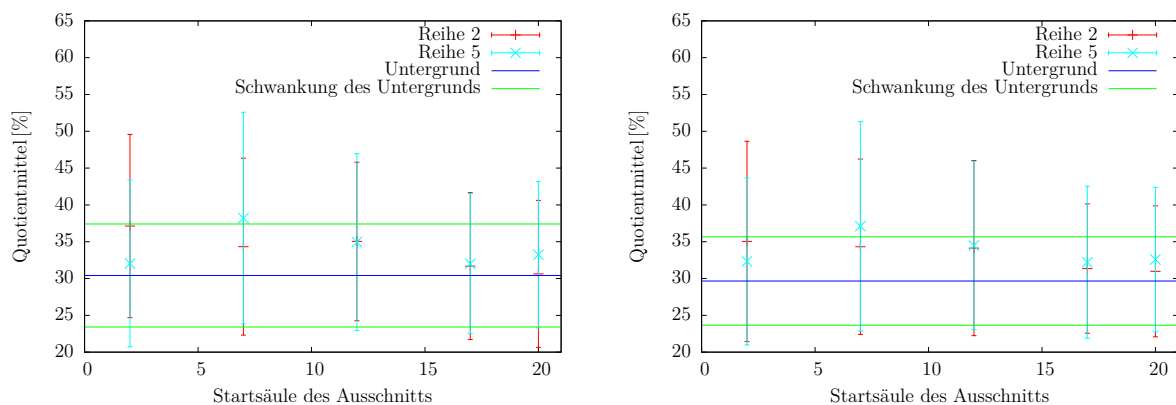
Die Schwankungen der Werte unterscheiden sich nicht. Dies kann darauf hindeuten, dass die Spannung selbst für kleine Abstände nicht im ganzen Ausschnitt hoch ist. Andererseits könnten sich die Werte um eine Konstante erhöht haben, sodass die Differenz bestehen blieb. Das hieße, dass die Spannung gleichmäßig im Gebiet ansteigt. Diesen Ansatz kann man durch Betrachtung der Bilder für kleine Säulenabstände verwerfen, weil dunklere Stellen selbst in ihnen zwischen den Säulen zu sehen sind.

Die Fehler der Mittelwerte, siehe Abbildung A.1, sind wegen der hohen Statistik in den

Ausschnitten sehr klein. Für die Messwerte der großen Blöcke ist der Fehler größer, woran man den Unterschied zwischen verschiedenen Gebieten sieht, möglicherweise verursacht durch unterschiedlichen Untergrund.

Zu bemerken ist zu der Auswertungsmethode, dass es für kleine Säulenabstände schwierig bis unmöglich ist, nur die sechs Säulen im Ausschnitt zu haben und genug Material um sie herum, um Spannung zu beobachten. Es wurde versucht ein Mittelweg zu gehen, indem nur Teile der eigentlichen Säulen in den Ausschnitt genommen werden, dafür aber Teile von anderen Säulen enthalten sind. Dadurch sollten effektiv sechs Säulen im Gebiet sein. Die Ergebnisse dieses Abschnittes haben leider keine Statistik sondern nur einen Wert für einen Säulenabstand bei einer Energie. Die Ausnahme ist dabei die Betrachtung der großen Blöcke. Deswegen müssen die Werte mit Vorsicht behandelt werden und geben nur eine ungefähre Größe an, auch wenn die einzelnen Fehler klein sind wegen der hohen Anzahl von Pixeln im Ausschnitt.

4.4.4. Mittelwerte des Quotienten in Ausschnitten mit zwölf Säulen



(a) Vorderseite.

(b) Rückseite.

Abb. 4.11.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von zwölf Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$. Der angegebene Fehler entspricht der Standardabweichung.

Die gleiche Auswertung des letzten Abschnittes wird für zwölf Säulen in den beiden großen Blöcken mit 8×24 Säulen wiederholt. Die zwölf Säulen sind das Maximum an inneren Säulen in der Gitteranordnung, die mit dem Bildausschnitt der Probe Station für den Block mit $50 \mu\text{m}$ Säulenabstand beobachtet werden können. Sie sind in drei Reihen à vier Säulen angeordnet. Die Ausschnitte werden nach der niedrigsten nummerierten Säule

4. Ergebnisse

sortiert. In Abbildung 4.11 und 4.12 sind die Mittelwerte der Ausschnitte der Blöcke mit $50\ \mu\text{m}$ bzw. $25\ \mu\text{m}$ Säulenabstand gegen die Startposition, also die niedrigste Spaltenzahl in einer Reihe, und sortiert nach den Reihen aufgetragen. Auch hier wieder für Vorder- und Rückseite getrennt und mit der Schwankung als Fehlerbalken dargestellt.

Die Werte für $50\ \mu\text{m}$ Säulenabstand unterscheiden sich um ungefähr fünf Prozentpunkte

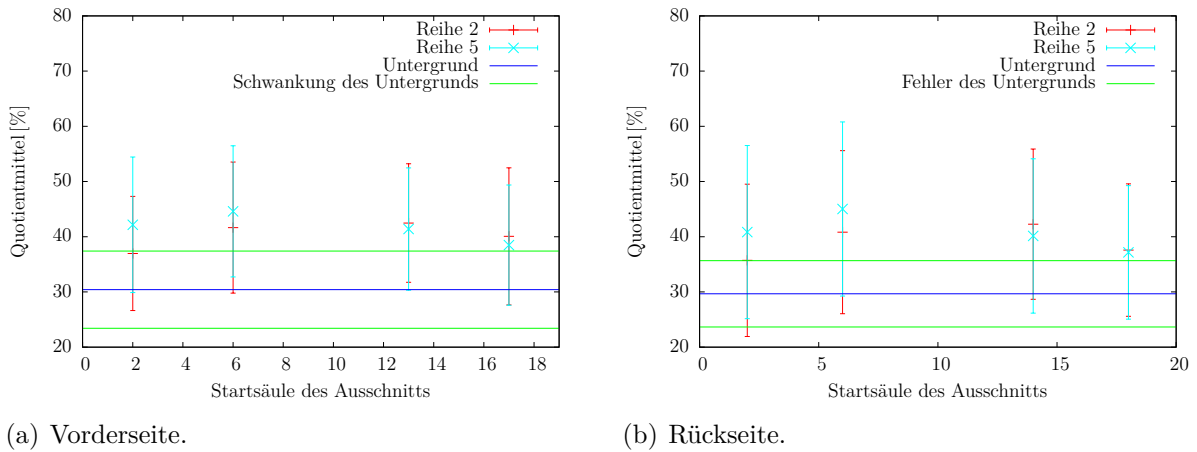


Abb. 4.12.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von zwölf Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $25\ \mu\text{m}$. Der angegebene Fehler entspricht der Standardabweichung.

untereinander und liegen nicht weit vom Untergrund entfernt. Zwei höher nummerierte Ausschnitte der Rückseite befinden sich sogar im Fehlerbereich des Untergrunds. Dies kann mit dem in Abschnitt 4.4.2 angesprochenen Fehlen der Säulen in diesem Bereich erklärt werden. Ein Ausschnitt der Vorderseite liegt ebenso im Untergrundbereich, was als Fluktuation angesehen werden kann.

Die Werte für $25\ \mu\text{m}$ Säulenabstand liegen fast alle über dem höchsten des $50\ \mu\text{m}$ Blocks. Sie variieren um zehn Prozentpunkte untereinander.

Bildet man aus den dargestellten Werten jeweils für die Seiten des Diamanten und den Säulenabstand das Mittel, erhält man die Werte in Tabelle 4.2.

Diese Werte zeigen, dass sich die Vorder- und Rückseite nicht signifikant unterscheiden.

Säulenabstand [μm]	Mittelwert des Quotienten [%]	
	Vorderseite	Rückseite
50	34 ± 1	33 ± 1
25	41 ± 1	40 ± 2

Tab. 4.2.: Werte des Quotienten für Untergrund der Vorderseite und der Rückseite des Diamanten.

4.4. Werte für den Quotienten

Außerdem sieht man wieder die Abhängigkeit von dem Säulenabstand, dass die Spannung höher ist für kleine Abstände, hier um sieben Prozentpunkte. Diese Werte sind auch konsistent mit den Werten für Ausschnitte mit sechs Säulen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Thema dieser Arbeit ist Charakterisierung von Graphitelektroden im Diamant. Als Größe für die Charakterisierung ist die mechanische Spannung an den Säulen gewählt worden.

Die Motivation hinter dieser Arbeit liegt in dem Bemühen, bessere Detektoren für z. B. die Hochenergie-Teilchenphysik zu bauen. Dabei könnte Diamant wegen seiner Eigenschaften wie Strahlenhärte und geringem Rauschen eine mögliche Option sein. Im Diamant und besonders in Polykristallen werden aber an Fehlstellen driftende Ladungen nach kurzen Distanzen im Bereich von $50\ \mu\text{m}$ eingefangen, die in einem Detektor zur Signalerzeugung benötigt werden. Mit einer 3D-Anordnung von Elektroden im Diamanten könnte dieses Problem umgangen werden.

Der Ansatz hier, um die Elektroden zu erzeugen, ist eine Bestrahlung mit hohen Energieflüssen durch einen Femtosekundenlaser. Mit diesem können die sp^3 Bindungen des Kohlenstoffs im Diamanten in sp^2 Bindungen des Graphits umgewandelt werden. Da Graphit aber eine geringere Dichte als Diamant hat, wird erwartet, dass es zu mechanischer Spannung im Diamanten durch die Volumenausdehnung kommt.

Die Parameter beim Erzeugen der Säulen sind hauptsächlich die Laserleistung und der Säulenabstand. Die Säulen werden in Blöcken mit einer Dreiecksgitterstruktur angeordnet, um den Einfluss der Säulen aufeinander zu beobachten.

Mit einem optischen Aufbau aus zwei linearen Polarisatoren ist die mechanische Spannung im Diamanten gemessen worden.

Die gemachten Bilder zeigen um die Säulen Spannung und auch zwischen ihnen. Außerdem beobachtet man, dass im Polykristall selber Spannung vorhanden ist, was auf Korngrenzen zurückgeführt wird. Betrachtet man Gebiete mit gleicher Säulenanzahl, erhält man eine Abhängigkeit der Spannung von dem Abstand der Säulen und der Laserintensität. Im Mittel ist die Spannung demnach höher für kleine Säulenabstände und größere Laserleistungen.

Eine Empfehlung eines Parametersatzes für einen möglichen 3D-Diamantdetektor unter Berücksichtigung der mechanischen Spannung wäre ein Elektrodenabstand von $50\ \mu\text{m}$ und eine Laserintensität von $50\ \text{mW}$. Bei diesen Werten liegt die gemessene Spannung inner-

5. Zusammenfassung und Ausblick

halb des Schwankungsbereichs des Untergrunds, der im Diamanten vorhanden ist.

Um einen funktionierenden 3D-Diamantdetektor bauen zu können, müssen noch einige Eigenschaften der Graphitelektroden getestet werden, z. B. muss überprüft werden, ob die Säulen in einer Homogenität erzeugt werden können, sodass Strom durch sie fließen kann.

Des Weiteren muss die Technik der Graphitisierung weiter verfeinert werden. Besonders bei dem hier verwendeten Aufbau ist die Fokusbreite eine unbekannte Größe. Wäre sie bekannt könnte man die Laserleistungen in Energieflüsse umrechnen und so die eigenen Ergebnisse mit anderen Gruppen besser vergleichen.

A. Graphen, Tabellen und Formeln

A.1. Diamantdicke

Dicke [μm]	Fehler [μm]
519	5
516	5
518	5
515	5
513	5
516	5
517	5
Mittelwert [μm]	Fehler aus Fehlerfortpflanzung und Standardabweichung [μm]
516	2

Tab. A.1.: Messwerte für die Bestimmung der Dicke des Diamanten an mehreren Positionen des aufrecht stehenden Diamanten gemessen.

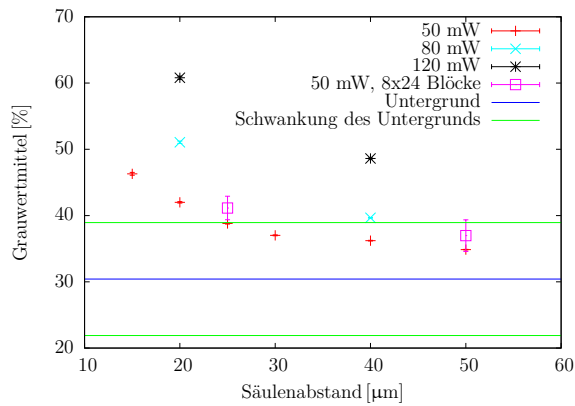
A.2. Formel für den Brechungsindex im Diamanten

Formel für den Brechungsindex in Diamant bei eine Wellenlänge λ in μm , aus [10]:

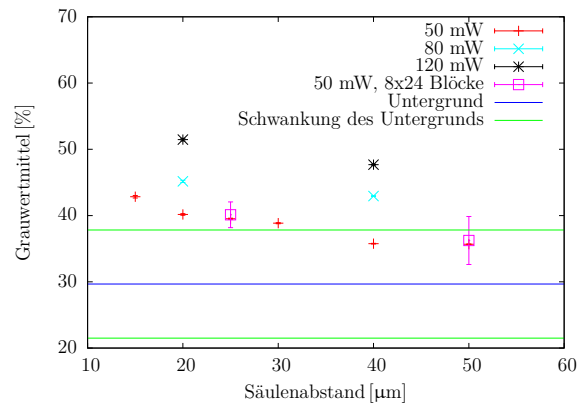
$$n = \sqrt{\frac{4.3356\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1060^2} + \frac{0.3306\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1750^2} + 1} \quad (\text{A.1})$$

A.3. Graphen

A. Graphen, Tabellen und Formeln

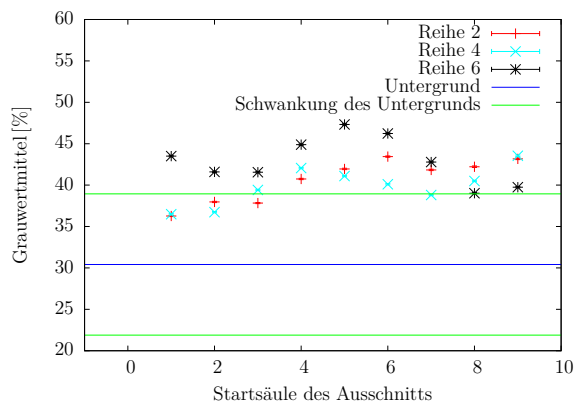


(a) Vorderseite.

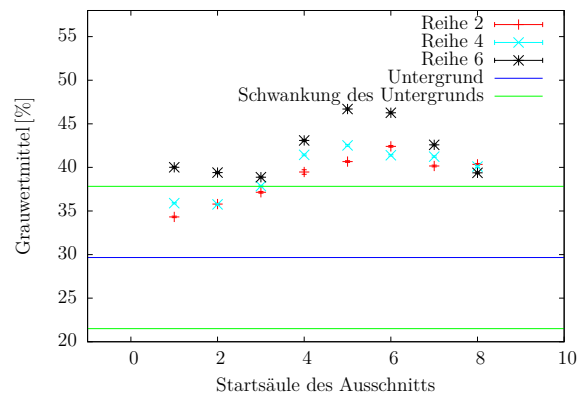


(b) Rückseite.

Abb. A.1.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von sechs Säulen aus den verschiedenen Blöcken mit 4×4 Säulen und zum Vergleich zwei Werte der größeren Blöcke. Der angegebene Fehler ist der Fehler des Mittelwertes.

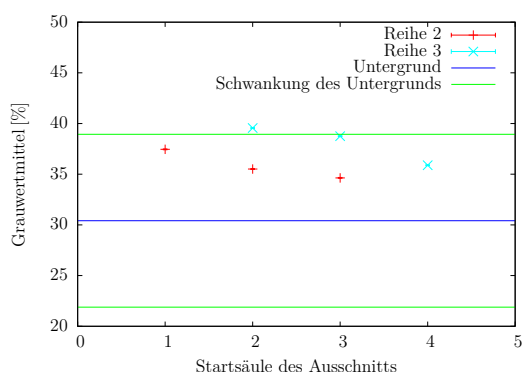


(a) Vorderseite.

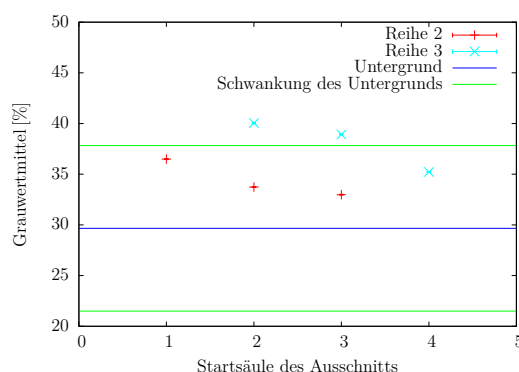


(b) Rückseite.

Abb. A.2.: Mittelwerte und Fehler des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von sechs Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $25 \mu\text{m}$. Reihe und Startsäule gibt die Säule in der unteren bzw. oberen rechten Ecke des Ausschnitts an.

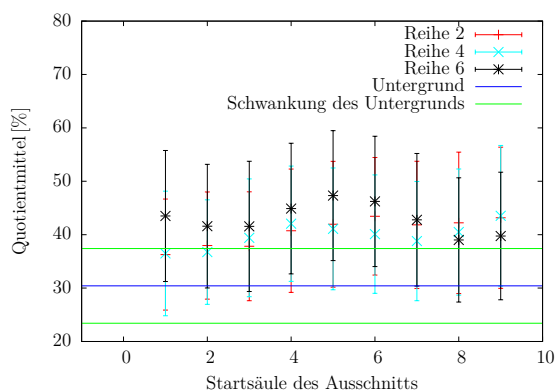


(a) Vorderseite.

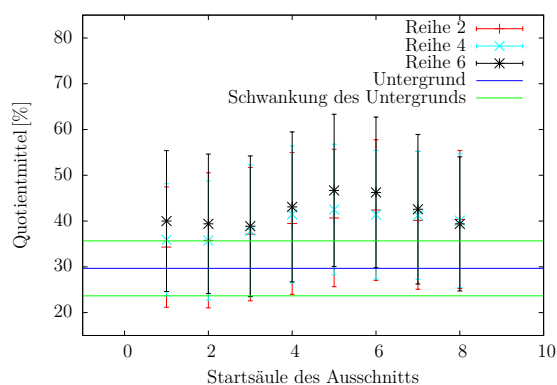


(b) Rückseite.

Abb. A.3.: Mittelwerte und Fehler des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von sechs Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$. Reihe und Startsäule gibt die Säule in der unteren bzw. oberen rechten Ecke des Ausschnitts an.



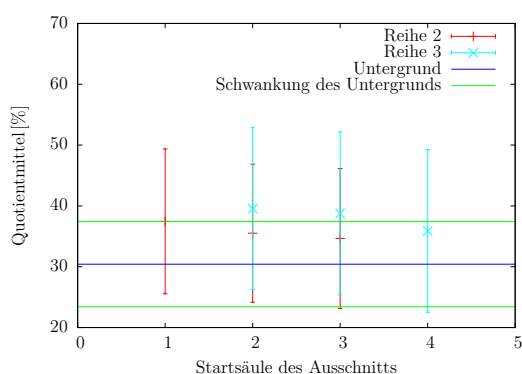
(a) Vorderseite.



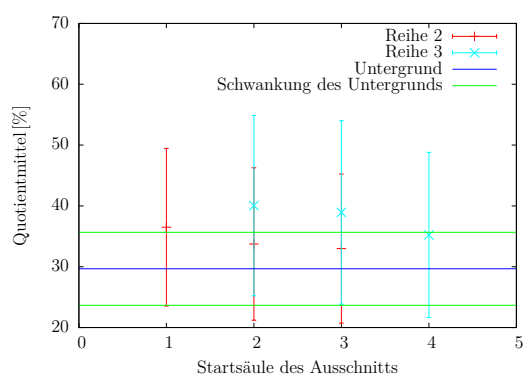
(b) Rückseite.

Abb. A.4.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von sechs Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $25 \mu\text{m}$. Reihe und Startsäule gibt die Säule in der unteren bzw. oberen rechten Ecke des Ausschnitts an. Der angegebene Fehler entspricht der Standardabweichung.

A. Graphen, Tabellen und Formeln

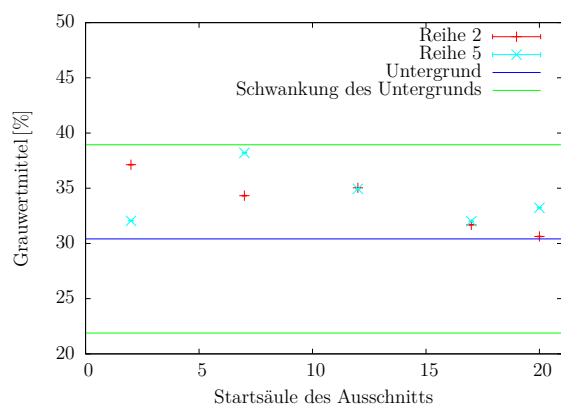


(a) Vorderseite.

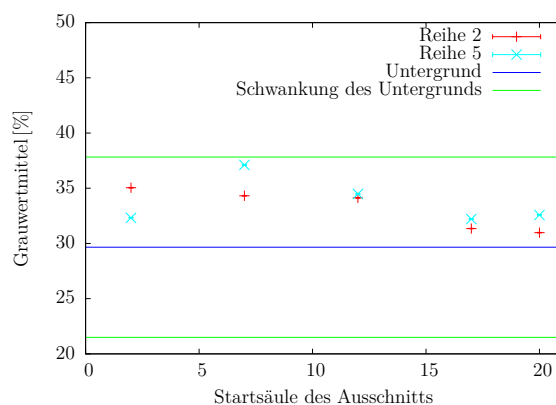


(b) Rückseite.

Abb. A.5.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von sechs Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$. Reihe und Startsäule gibt die Säule in der unteren bzw. oberen rechten Ecke des Ausschnitts an. Der angegebene Fehler entspricht der Standardabweichung.

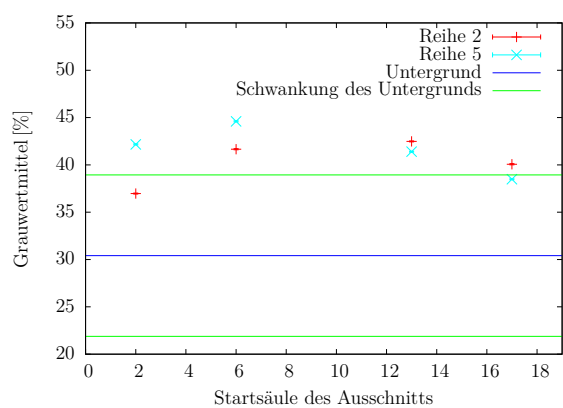


(a) Vorderseite.

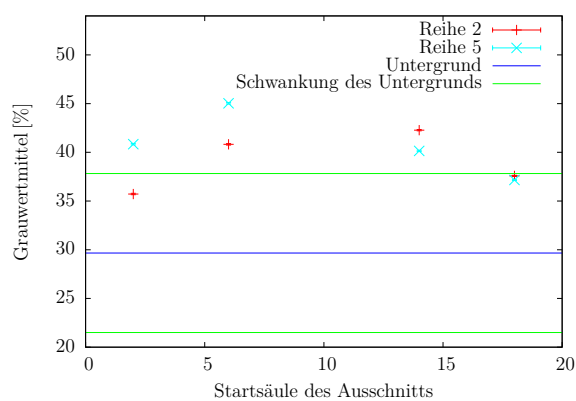


(b) Rückseite.

Abb. A.6.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von zwölf Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $50 \mu\text{m}$. Der angegebene Fehler ist der Fehler des Mittelwertes.



(a) Vorderseite.



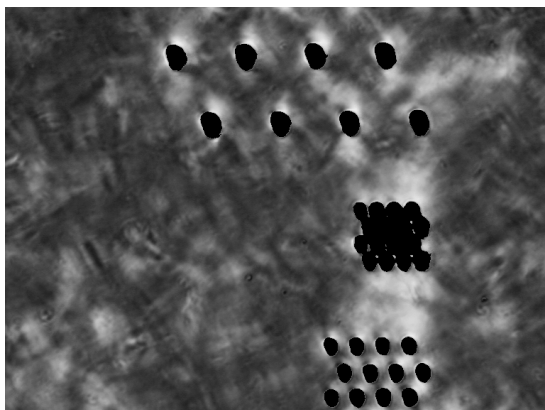
(b) Rückseite.

Abb. A.7.: Mittelwerte des Quotienten in Prozent für den Ausschnitt von zwölf Säulen aus dem 8×24 Block mit Säulenabstand von $25 \mu\text{m}$. Der angegebene Fehler ist der Fehler des Mittelwertes.

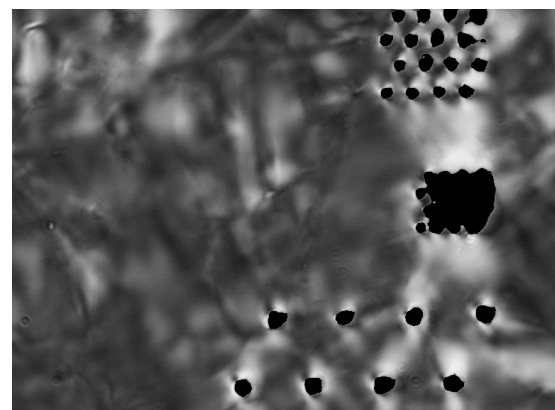
B. Bilder

Auf die ersten vier Bilder wird in der Arbeit explizit verwiesen, deswegen stehen sie an erster Stelle in der Reihenfolge der Nennung.

Die weiteren Bilder sind nach Reihenfolge der Erstellung sortiert und die Bilder der Vorderseite vor denen der Rückseite. Schon in früheren Kapiteln dargestellte Bilder werden nicht noch mal gezeigt. Zur Vereinfachung werden nur die Parameterwerte der Säulen auf den Bildern angegeben ohne die Größe selber zu nennen. Für die 4×4 Blöcke befindet sich der gezeigte Block mittig im Bild. Dies sind alle Bilder des Quotienten die analysiert wurden.



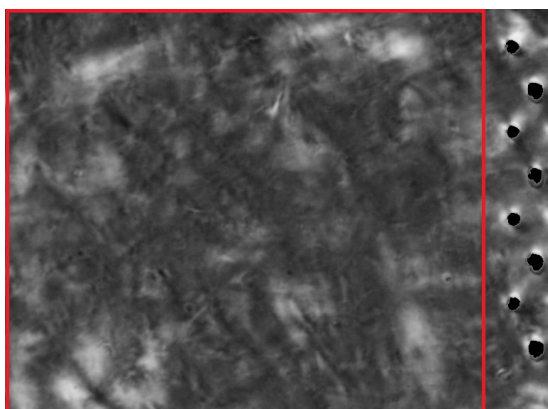
(a) Vorderseite.



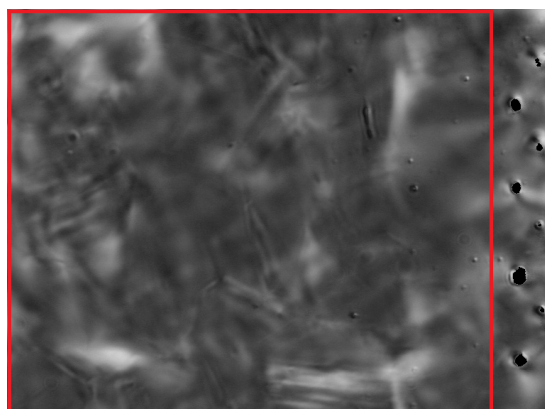
(b) Rückseite.

Abb. B.1.: Mittig ist jeweils der 4×4 Block mit $10 \mu\text{m}$ Säulenabstand und 50 mW Laserleistung zu sehen.

B. Bilder

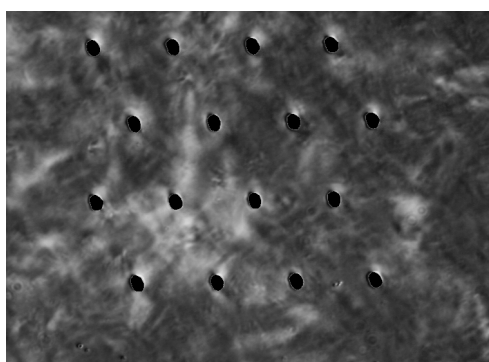


(a) Vorderseite.

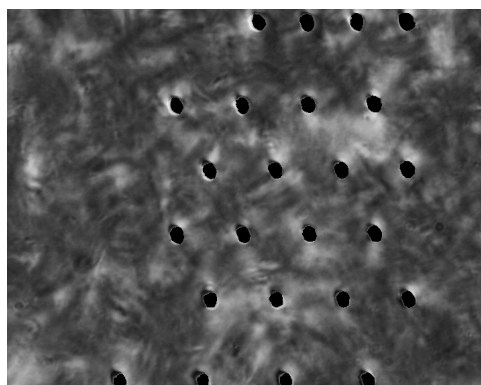


(b) Rückseite.

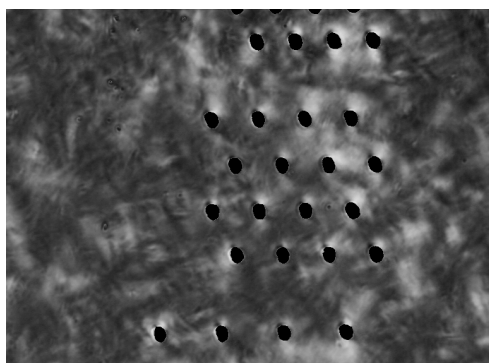
Abb. B.2.: Für die Untergrundberechnung verwendete Bilder, eingezeichnet die benutzten Gebiete neben den letzten Säulen des 8×24 Blocks mit Säulenabstand $50 \mu\text{m}$.



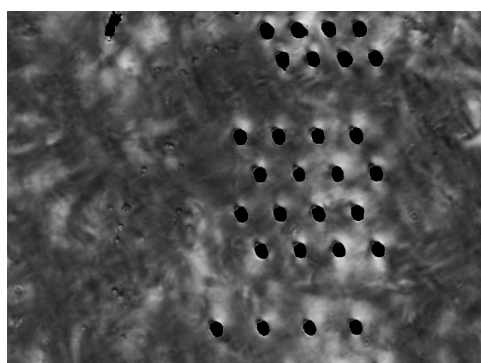
(a) 4×4 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW, Vorderseite.



(b) 4×4 , $40 \mu\text{m}$, 50 mW, Vorderseite.

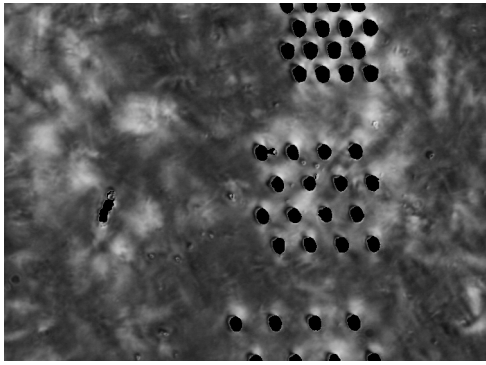


(c) 4×4 , $30 \mu\text{m}$, 50 mW, Vorderseite.

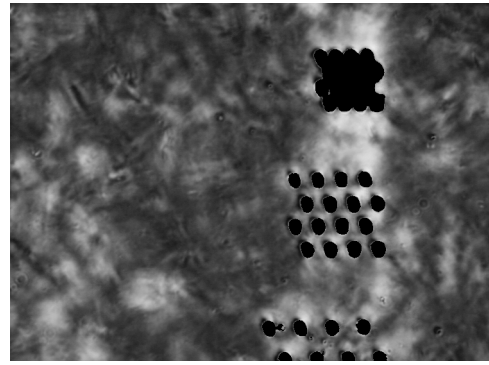


(d) 4×4 , $25 \mu\text{m}$, 50 mW, Vorderseite.

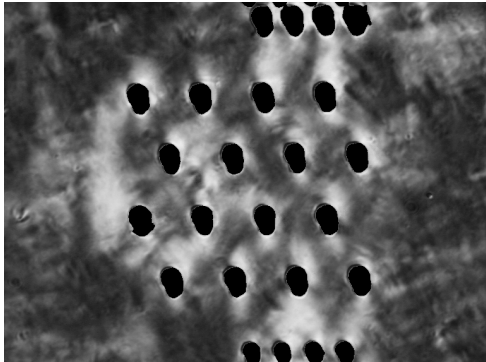
Abb. B.3.



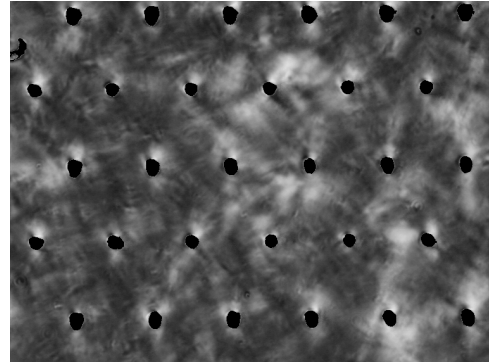
(a) 4×4 , $20 \mu\text{m}$, 50 mW , Vorderseite.



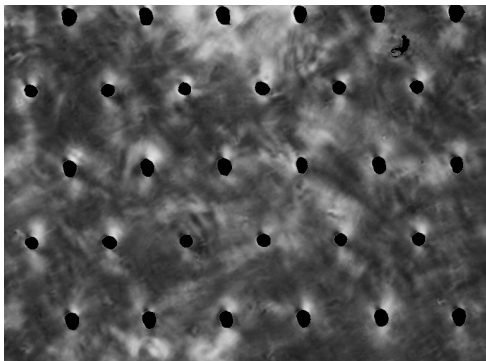
(b) 4×4 , $15 \mu\text{m}$, 50 mW , Vorderseite.



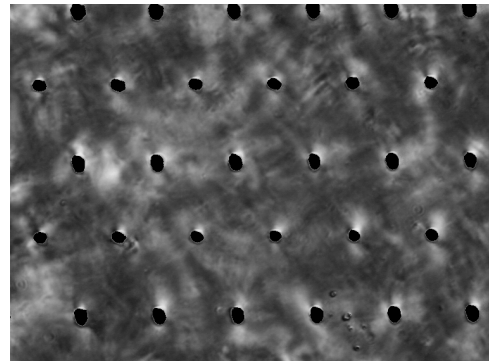
(c) 4×4 , $40 \mu\text{m}$, 120 mW , Vorderseite.



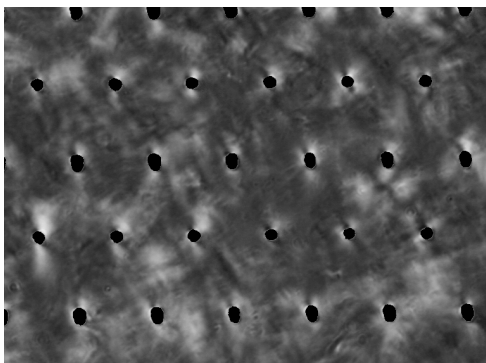
(d) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,1)-(4,6), Vorderseite.



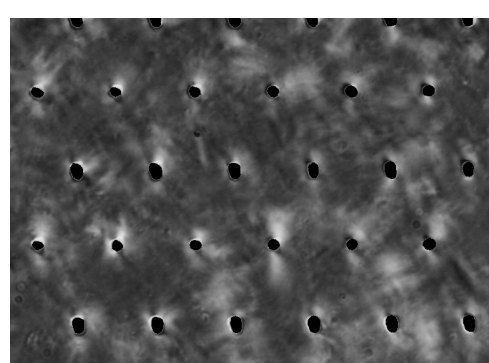
(e) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,6)-(4,11), Vorderseite.



(f) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,11)-(4,16), Vorderseite.

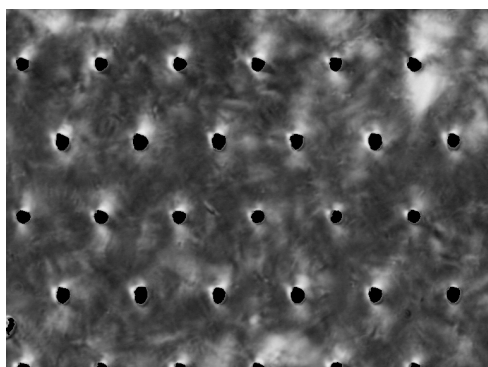


(g) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,16)-(4,21), Vorderseite.

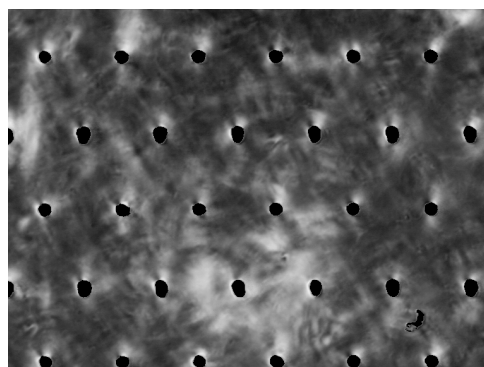


(h) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,19)-(4,24), Vorderseite.

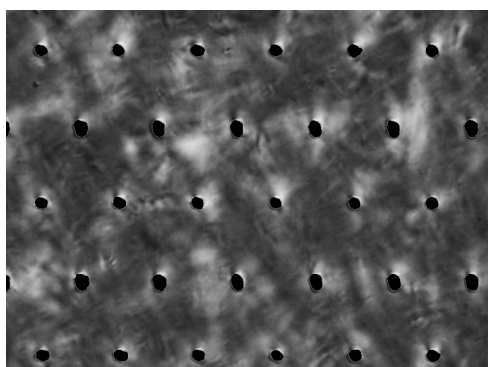
B. Bilder



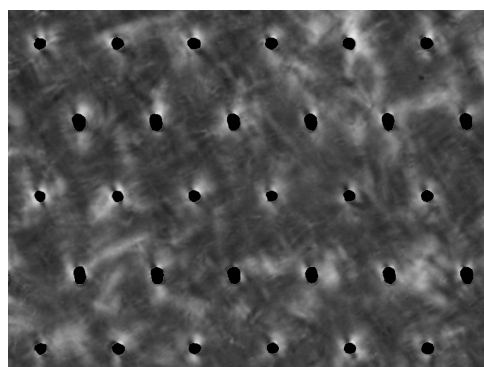
(a) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,1)-(8,6), Vorderseite.



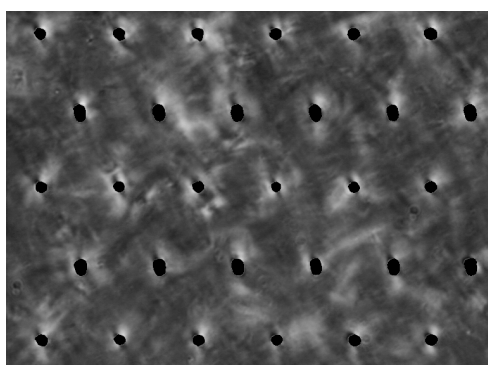
(b) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,6)-(8,11), Vorderseite.



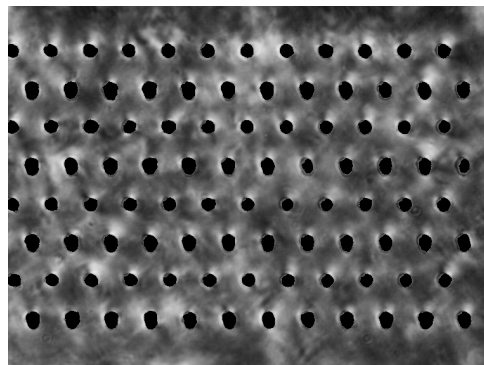
(c) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,11)-(8,16), Vorderseite.



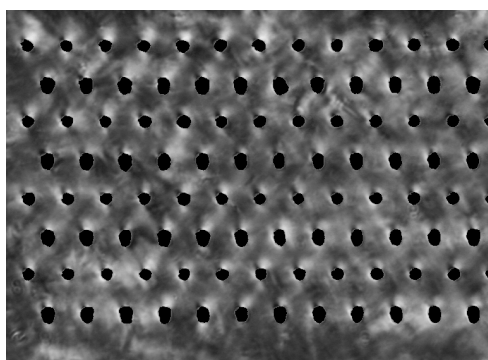
(d) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,16)-(8,21), Vorderseite.



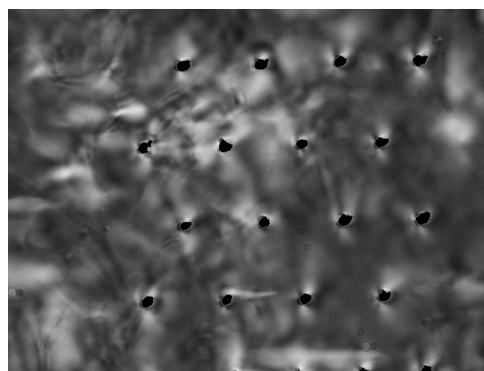
(e) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,19)-(8,24), Vorderseite.



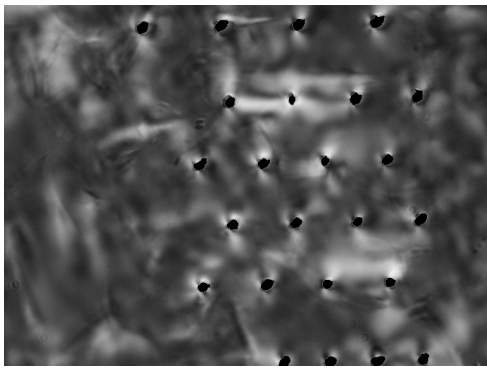
(f) 8×24 , $25 \mu\text{m}$, 50mW , (1,1)-(8,12), Vorderseite.



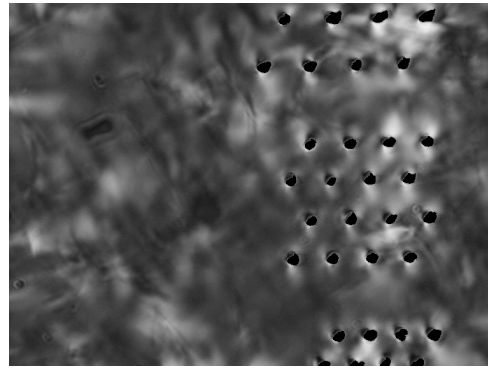
(g) 8×24 , $25 \mu\text{m}$, 50mW , (1,13)-(8,24), Vorderseite.



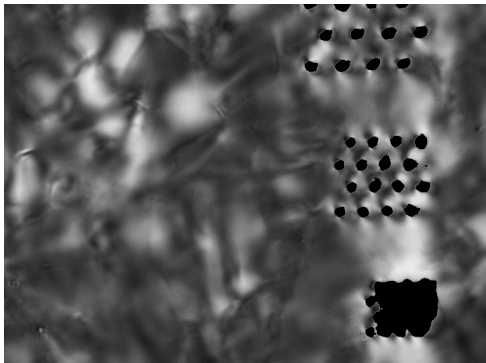
(h) 4×4 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , Rückseite.



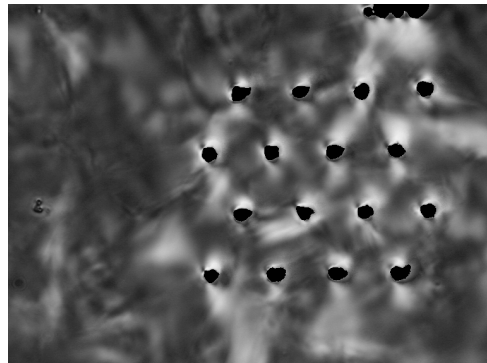
(a) 4×4 , $40 \mu\text{m}$, 50 mW , Rückseite.



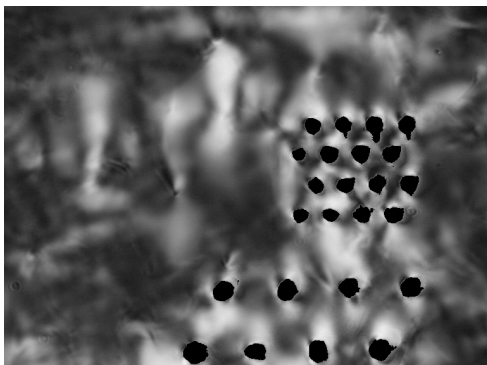
(b) 4×4 , $25 \mu\text{m}$, 50 mW , Rückseite.



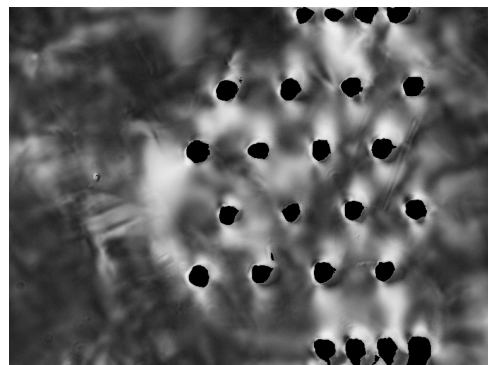
(c) 4×4 , $15 \mu\text{m}$, 50 mW , Rückseite.



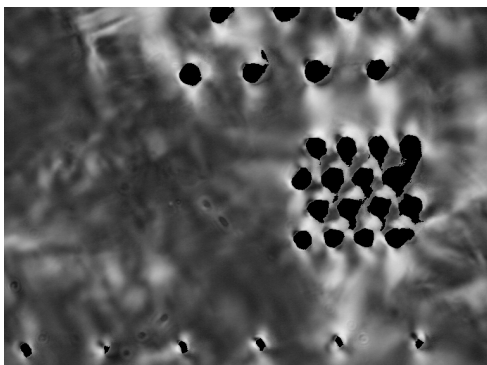
(d) 4×4 , $40 \mu\text{m}$, 80 mW , Rückseite.



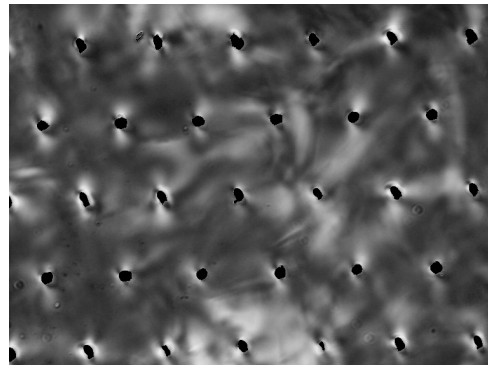
(e) 4×4 , $20 \mu\text{m}$, 80 mW , Rückseite.



(f) 4×4 , $40 \mu\text{m}$, 120 mW , Rückseite.



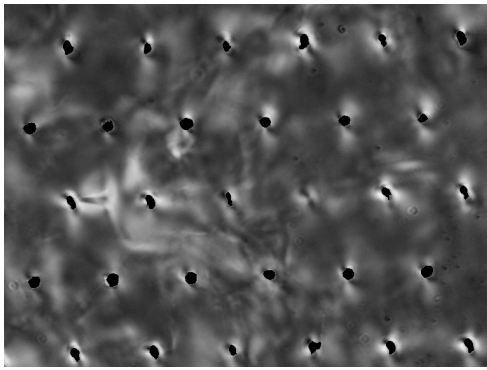
(g) 4×4 , $20 \mu\text{m}$, 120 mW , Rückseite.



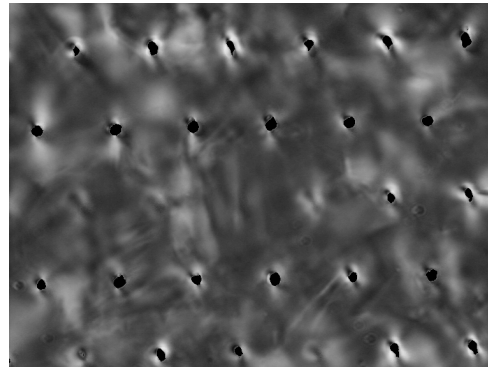
(h) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,6)-(4,11), Rückseite.

Abb. B.6.

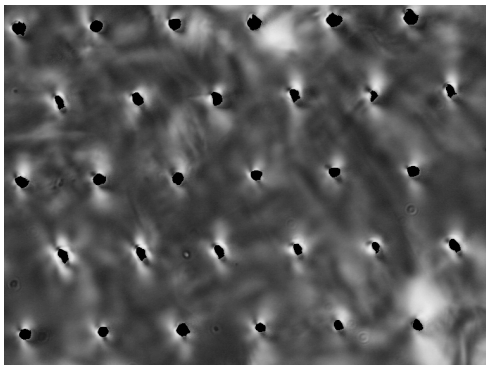
B. Bilder



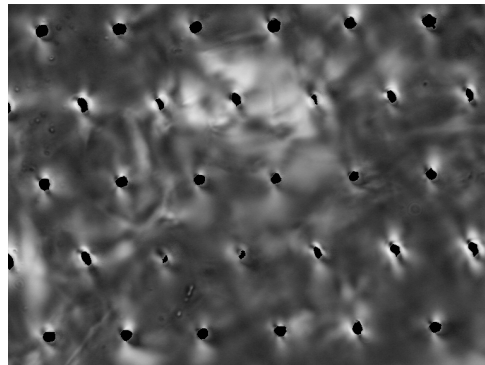
(a) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (1,11)-(4,16),
Rückseite.



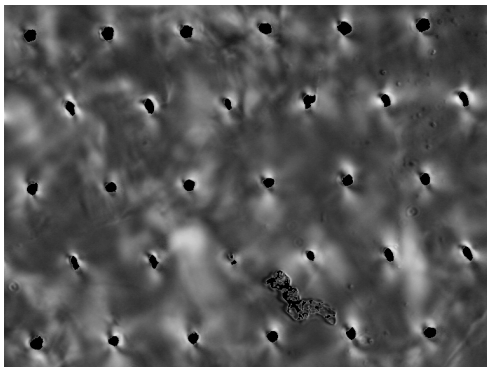
(b) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (1,16)-(4,21),
Rückseite.



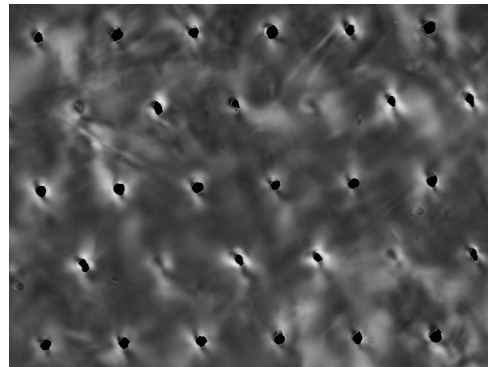
(c) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,1)-(8,6),
Rückseite.



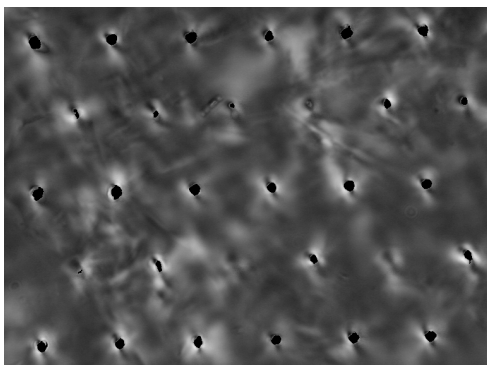
(d) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,6)-(8,11),
Rückseite.



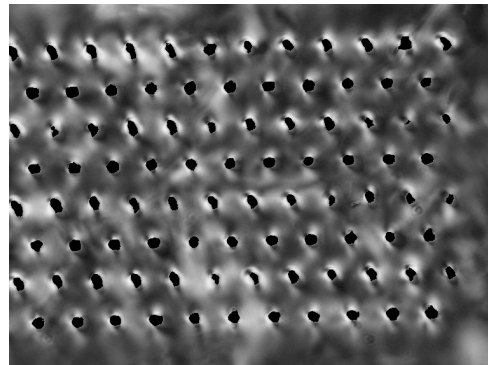
(e) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,11)-(8,16),
Rückseite.



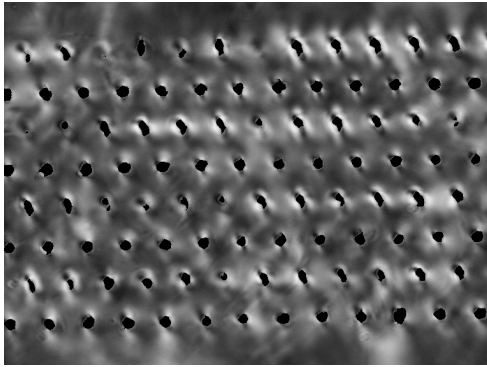
(f) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,16)-(8,21),
Rückseite.



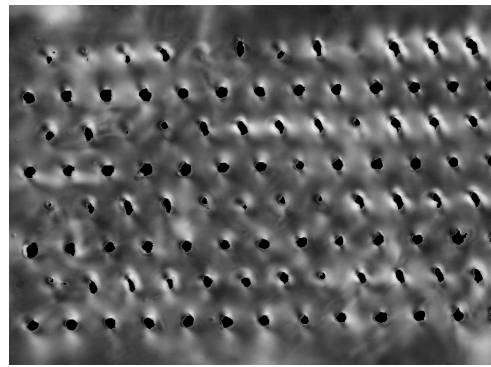
(g) 8×24 , $50 \mu\text{m}$, 50mW , (5,19)-(8,24),
Rückseite.



(h) 8×24 , $25 \mu\text{m}$, 50mW , (1,1)-(8,11),
Rückseite.



(a) 8×24 , $25 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,11)-(8,22),
Rückseite.



(b) 8×24 , $25 \mu\text{m}$, 50 mW , (1,13)-(8,24),
Rückseite.

Abb. B.8.

Literaturverzeichnis

- [1] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments: A How-to Approach*, Springer-Verlag (1994)
- [2] K. Nakamura et al., *The Review of Particle Physics*, J. Phys. G **37**, 075021 (2010)
- [3] J. Große-Knetter, *Vertex Measurement at a Hadron Collider - The ATLAS Pixel Detector*, Ph.D. thesis, Bonn University (2008)
- [4] H. Pernegger, *High Mobility Diamonds and Particle Detectors*, WILEY-VCH Verlag, Weinheim (2008)
- [5] S. I. Parker et al., *3D - A proposed new architecture for solid-state radiation detectors*, Nuc. Inst. and Meth. A **395**, 328 (1997)
- [6] I. Friel, *Optical Engineering of Diamond*, chapter 2: Optical Quality Diamond Grown by Chemical Vapor Deposition, WILEY-VCH (2013)
- [7] C. D. Via et al., *Advances in silicon detectors for particle tracking in extreme radiation environments*, Nucl. Inst. and Meth. A **509(1-3)**, 86 (2008)
- [8] V. I. Konov et al., *Optical Engineering of Diamond*, chapter 12: Laser Micro- and Nanoprocessing of Diamond Materials, WILEY-VCH (2013)
- [9] L. Föppel, E. Mönch, *Praktische Spannungsoptik*, Springer-Verlag (1959)
- [10] M. Bass et al, *Handbook of Optics*, volume II: Devices, Measurements and Properties, Mc-GRAW-HILL, INC. (1995)
- [11] Edmund Optics, *Katalog* (2013)
- [12] M. Neff et al., *Femtosecond laser writing of buried graphitic structures in bulk diamond*, Applied Physics A: Materials Science & Processing **97**, 543 (2009)

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei Prof. Dr. Arnulf Quadt dafür bedanken, dass ich meine Bachelorarbeit in seiner Arbeitsgruppe schreiben durfte.

Ebenso geht mein Dank an meinen Betreuer Lars Graber für vielfältige Unterstützung und nützliche Hinweise.

Ein besonderer Dank gebührt dem Laser-Laboratorium Göttingen e.V. in Person von Dr. Jürgen Ihlemann, Dr. Thomas Fricke-Begemann und Sebastian Kutsch für die Bereitstellung des Versuchsaufbaus zur Graphitisierung des Diamanten und Betreuung bei der Durchführung.

Zuletzt danke ich meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben.

Erklärung

nach §13(8) der Prüfungsordnung für den Bachelor-Studiengang Physik und den Master-Studiengang Physik an der Universität Göttingen:

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe.

Darüberhinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, im Rahmen einer nichtbestandenenen Prüfung an dieser oder einer anderen Hochschule eingereicht wurde.

Göttingen, den 20. Oktober 2014

(Helge Christoph Beck)