

Morphologische Untersuchungen ultradünner
Pentacen-Filme

Philipps



Universität
Marburg

Bachelorarbeit
vorgelegt von
Antonia Morherr

Marburg, den 21.6.2010

Vom Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg als
Bachelorarbeit am 21.06.2010 angenommen.

Erstgutachter: Prof. Dr. Gregor Witte

Zweitgutachter: PD Dr. Jens Gdde

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1. Einleitung	1
2. Wachstum von Pentacen auf SiO₂	3
2.1 Pentacen	3
2.1.1 Kristallstruktur	3
2.2 Das Substrat - Siliziumdioxid (SiO ₂)	4
2.3 Wachstumsprozesse	4
2.4 Fraktales Wachstum	5
2.4.1 Fraktale Dimensionen	5
2.4.2 Formfaktor	6
3. Experimentelle Methoden	9
3.1 Organische Molekularstrahldeposition - OMBD	9
3.1.1 Herstellung der Proben	9
3.1.2 Verschiedene Waferqualitäten	10
3.2 AFM	11
3.2.1 Tapping-Mode	12
3.2.2 Temperatur aufgelöste Messungen mit dem AFM	12
3.2.3 Reproduzierbare Positionierung der AFM-Spitze	14
3.3 Statistische Auswertung	15
4. Ergebnisse	17
4.1 Einfluss des Substrats auf das Wachstum	17
4.2 Morphologische Veränderungen	18
4.2.1 Unter AFM (an Luft) geheizte Proben	18
4.2.2 Schrittweise im Vakuum geheizt	19
4.2.3 Direkt im Vakuum geheizt	20
4.3 Fraktale Größen	24
4.3.1 Fraktale Dimension	24
4.3.2 Formfaktor	24
4.4 Fazit	26

5. Ausblick	27
Literaturverzeichnis	29
Danksagung	31

Kapitel 1

Einleitung

Organische Materialien finden heute bereits in vielen Bereichen Anwendung. Sie bestehen vereinfacht ausgedrückt aus Molekülen, deren wesentliche Strukturelemente Verbindungen mit Kohlenstoffatomen sind. Besonderes Interesse gilt dabei Verbindungen, die π -Elektronensysteme enthalten, wie die Acene (hier im Besonderen das Pentacen).

In den letzten Jahren ist vor allem das Interesse an der Herstellung von elektronischen Bauteilen gestiegen. Die Vorteile liegen hier vor allem in der kostengünstigen Herstellung und einfachen Handhabung bei niedrigen Temperaturen (verglichen mit anorganischen Materialien). Beispiele für organische Elektronik sind die organischen Feldeffekttransistoren (OFETs) und Leuchtdioden aus organischem Material (OLEDs), die im Vergleich zu anorganischen Leuchtdioden kostengünstiger hergestellt werden können und Anwendung in OLED-Flachbildschirmen finden. Ein Nachteil ist allerdings die geringere Lebensdauer gegenüber den anorganischen LEDs. Auch in der Medizin finden organische Materialien aufgrund ihrer Eigenschaften Anwendung, da der menschliche Organismus zum Großteil aus organischem Material besteht (DNA, Zellwände, usw.).

Um diese organischen Bauteile und deren Herstellung zu verstehen bzw. zu verbessern, benötigt man Informationen über das Wachstum der organischen Schichten, sowie deren Stabilität in Abhängigkeit der Zeit und der Temperatur.

Das Molekül Pentacen ist aufgrund seiner (für organische Materialien) hohen Ladungsträgermobilität ($5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) von besonderem Interesse für die Herstellung von elektronischen Bauteilen. Anorganische Stoffe wie zum Beispiel Silizium haben dagegen eine deutlich höhere Ladungsträgermobilität ($> 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$). Das Wachstum von Pentacen auf Siliziumdioxid wurde bereits in diversen Arbeiten untersucht und charakterisiert (siehe [1]). In der Arbeit von D. Käfer et. al. [2] wird die thermisch aktivierte Entnetzung von organischen Dünnschichten, unter anderem von Pentacen auf Siliziumdioxid mit Hilfe von XPS-Messungen untersucht. Hier wurde das nachträgliche Zusammenziehen der Pentacenmoleküle zu blockartigen Strukturen beobachtet. Ausgehend von diesen Ergebnissen war die Motivation dieser Bachelorarbeit, das beobachtete, entnetzende Verhalten von Pentacen direkt unter dem AFM bei verschie-

denen Temperaturen nachzumessen und gegebenenfalls charakteristische Größen zur Beschreibung des entnetzenden Verhaltens zu ermitteln.

Dieser Effekt könnte einen Einfluss auf die Charakteristik eines auf Pentacen basierenden OFETs haben, wenn dieser einem bestimmten Temperaturgradienten ausgesetzt wird.

Kapitel 2

Wachstum von Pentacen auf SiO₂

2.1 Pentacen

Pentacen (C₂₂H₁₄) besteht aus fünf aneinanderhängenden Benzolringen, die in einer Ebene angeordnet sind. Die Dichte von Pentacen beträgt 1.32g/cm³ und der Abstand zwischen HOMO und LUMO beträgt 2.2 eV, was 560 nm entspricht. Pentacen ist ein guter organischer Halbleiter mit einer (für organische Materialien) hohen Ladungsträgermobilität von 5 cm²/Vs [3].

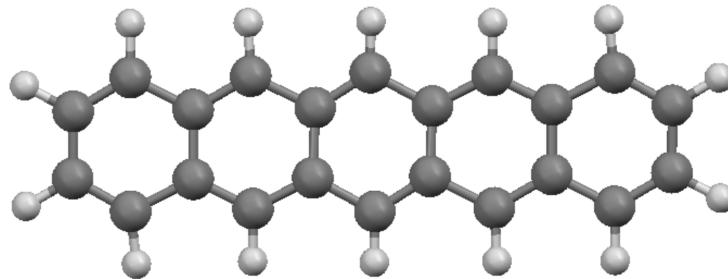


Abb. 2.1: Pentacen (C₂₂H₁₄)

2.1.1 Kristallstruktur

Das Pentacen kristallisiert im (für zyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) typischen *face-on-edge*-Herringbone-Modell und (aufgrund der Quadrupolwechselwirkung) nicht im einfachen π -Stacking. Neben vielen anderen organischen Materialien besitzt Pentacen ebenfalls nicht nur eine Kristallstruktur. Es treten zwei Polymorphismen in der kristallinen Phase auf, die als Campbell- bzw. Siegrist-Phase bezeichnet werden. Der (001)-Ebenenabstand der beiden Polymorphismen unterscheidet sich dabei leicht: $d_{\text{bulk}}(\text{Campbell}) = 14.5 \text{ \AA}$ [4] und $d_{\text{bulk}}(\text{Siegrist}) = 14.1 \text{ \AA}$ [5]. Daneben tritt auf einigen Substraten wie SiO₂, TiO₂ oder HOPG, noch ein weiterer Polymorphismus von Pentacen auf, die sogenannte Dünnschicht-Phase. Die einzel-

nen Pentacenmoleküle ordnen sich aufrechter an als in der Festkörperphase und der Ebenenabstand beträgt $d_{\text{thinfilmm}} = 15.5 \text{ \AA}$ [6]. Ab einer gewissen Filmdicke geht das Wachstum dann wieder in die Festkörperphase über.

2.2 Das Substrat - Siliziumdioxid (SiO₂)

Siliziumdioxid findet eine breite Anwendung als Substratmaterial aufgrund seines niedrigen Preises und einfacher Handhabung in der Präparation. Bei SiO₂ handelt es sich um ein amorphes Substrat, das heißt unabhängig von der Orientierung des Silizium-Wafers bildet sich auf dem reinen Silizium eine amorphe Oxidschicht aus. Die Pentacenmoleküle wachsen aufrecht (aber nicht senkrecht) in (001)-Orientierung auf dem Substrat. Aufgrund der amorphen Eigenschaften von SiO₂ wachsen die Pentacenschichten in keiner bestimmten lateralen Vorzugsrichtung.

Bei bestimmten Substrattemperaturen und Schichtdicken wird für Pentacen ein dendritisches Wachstum beobachtet [7].

2.3 Wachstumsprozesse

Es gibt drei grundlegende Modelle für das Wachstum von Dünnschichten, die in Abbildung 2.2 dargestellt werden:

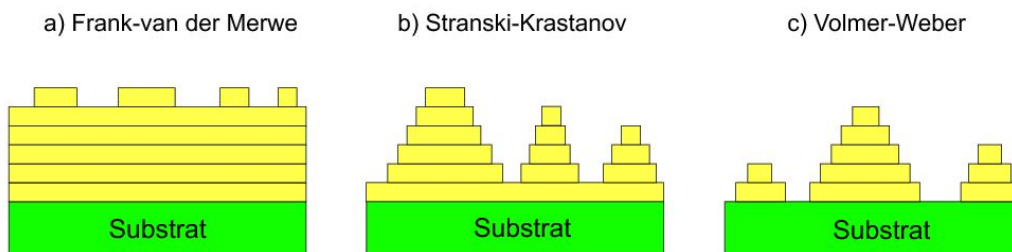


Abb. 2.2: verschiedene Wachstumsmodelle für organische Moleküle auf einem Substrat

Im Frank-van der Merwe Modell sind die Wechselwirkungen zwischen Adsorbat und Substrat groß, sodass sich geschlossene Lagen auf der Oberfläche bilden und kein Inselwachstum bevorzugt wird (sogenanntes 2D-Wachstum). Organische Materialien wachsen dagegen auf amorphen Substraten in 3D-Inseln, wenn die Molekül-Molekül-Wechselwirkungen stärker sind, als die Molekül-Substrat Wechselwirkungen. So wächst Pentacen auf Siliziumdioxid im Stranski-Krastanov Modell bzw. Volmer-Weber Modell [1].

Bei der Herstellung von Dünnschichten spielen verschiedene Parameter für das Wachstum und die Qualität des organischen Films eine Rolle. Insbesondere sind dies: die

Probentemperatur, die Aufdampftrate, das gewählte Substrat (sowie dessen Qualität) und der Druck in der Kammer. Treffen die Moleküle auf die Substratoberfläche, werden sie adsorbiert und diffundieren an der Oberfläche.

Bei der Adsorption auf der Oberfläche haben die auftreffenden Moleküle verschiedene Möglichkeiten. Das Adsorbat kann dann entweder ins Vakuum zurück desorbieren, neue Inseln bilden oder sich an anderen bereits bestehenden Inseln oder Defekten anlagern [1].

Das Substrat und dessen Qualität haben einen Einfluss auf die Diffusion. So ermöglicht ein glattes, sauberes Substrat eine langreichweitige Diffusion der auftreffenden Moleküle. Stufen oder Defekte auf der Substratoberfläche hemmen dagegen die Beweglichkeit und führen zu einer inhomogeneren Schichtbildung. Die Substrattemperatur während der Bedampfung hat ebenfalls einen Einfluss auf die Anordnung der einzelnen Moleküle auf der Substratoberfläche und somit auf die Morphologie und Kristallinität. Die Rate gibt an, wieviele Moleküle pro Zeiteinheit auf eine Fläche treffen, und hat einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, wie viele neue Inseln sich bilden und welche Größe sie durchschnittlich haben. Je geringer die Rate und je höher die Substrattemperatur, desto wahrscheinlicher ist es, dass sich die Moleküle zu großen Inseln zusammenfügen [8]. Um eine reproduzierbare Schichtdicke und -Morphologie herstellen zu können, ist somit eine möglichst genaue Messung der Substrattemperatur sowie der Aufdampftrate nötig.

2.4 **Fraktales Wachstum**

In der Natur tritt fraktales Wachstum in den unterschiedlichsten Formen auf. Ein einfaches Beispiel sind Eiskristalle, die sich im Winter auf einer Glasscheibe bilden. Auch in biologischen Systemen findet man fraktale Strukturen, zum Beispiel beim Wachstum von Bakterienstämmen. Diese Prozesse treten auf den unterschiedlichsten Längenskalen auf, auch bei der Herstellung von dünnen Schichten.

Zur Untersuchung von fraktalem Wachstum benötigt man Größen, mit deren Hilfe man die unterschiedlichen Wachstumsordnungen beschreiben und vor allem vergleichen kann. Im Folgenden sollen zwei mögliche Größen zur Beschreibung von Fraktalen vorgestellt werden. Dabei wird hier lediglich ein kurzer Einblick über die verwendeten Größen gegeben und nicht näher auf Annahmen und Herleitungen eingegangen. Zur ausführlichen Beschreibung sei auf weiterführende Literatur ([9],[10]) hingewiesen.

2.4.1 **Fraktale Dimensionen**

Fraktale Kurven (wie z. B. die Koch'sche Kurve in Abb. 2.3a)) können in der Mathematik durch unendliche Iteration fortgeführt werden. Sie lassen sich durch eine

Selbstähnlichkeitsdimension beschreiben:

$$d_s = \frac{\ln(N)}{\ln(p)}, \quad (2.1)$$

mit N Zerlegungsmengen (das bedeutet, kleinste Struktureinheit) und dem Vergrößerungsfaktor p (Faktor mit dem man die kleinste Struktureinheit verändert). Im Falle der Koch'schen Kurve erhält man:

$$d_s = \frac{\ln 4}{\ln 3} \approx 1.2618$$

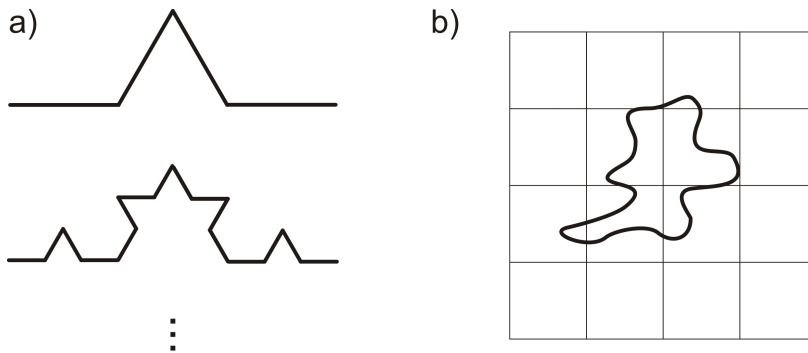


Abb. 2.3: a) Koch'sche Kurve; b) Counting-in-a-box-Verfahren

Auf fraktalähnliche Strukturen, die in der Natur vorkommen (wie z.B. Pentacen-Dendriten), lässt sich diese strenge Definition nicht anwenden. Um sie dennoch zu charakterisieren wird eine neue Größe, die fraktale Dimension, eingeführt:

$$d_F = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{N(n)}{\ln \frac{1}{r_n}} \quad (2.2)$$

Hier wird eine Überdeckung des Fraktals durch Kästchen gewählt, wobei $N(n)$ die Anzahl der Kästchen mit Kantenlänge r ist, die die Kurve schneiden („counting in a box“-Methode). Variiert man die Kantenlänge und trägt dieses logarithmisch auf, erhält man aus der Steigung die fraktale Dimension. Wählt man immer kleinere Kästchengrößen, geht die fraktale Dimension in die Selbstähnlichkeitsdimension über. Auf die mathematischen Beziehungen und Beweise soll hier nicht näher eingegangen werden. Diese Erläuterung soll nur eine Größe beschreiben, mit deren Hilfe sich fraktale Strukturen beschreiben lassen können. Fraktale Gebilde weisen eine größere fraktale Dimension auf, als weniger fraktale Gebilde.

2.4.2 Formfaktor

Für die Beschreibung von fraktalen Strukturen kann man auch Parameter wählen, bei denen man charakteristische Größen für das Wachstum, wie z.B. Umfang, Fläche

oder Höhe, direkt in der Definition verwendet. Ein Parameter, der einen Trend über die Veränderung der Morphologie der fraktalen Strukturen liefert, ist der sogenannte Formfaktor. Beim Formfaktor werden Fläche und Umfang ins Verhältnis gesetzt um (wie der Name schon sagt) eine Auskunft über die Form des Partikels zu erhalten. Der Formfaktor ist wie folgt definiert:

$$F = \frac{4\pi \cdot A}{U^2}, \quad (2.3)$$

wobei F der Formfaktor, A die Fläche und U der Umfang ist. Es handelt sich beim Formfaktor somit um eine einheitslose Größe.

In Abb. 2.4 sind ein paar Beispiele für Formfaktoren von verschiedenen geometrischen Körpern angegeben.

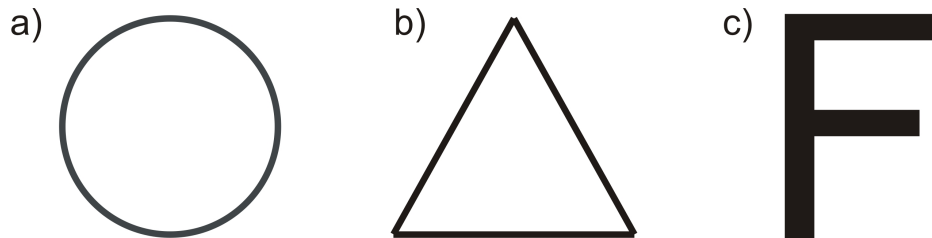


Abb. 2.4: a) Kreis: $F=1$; b) gleichseitiges Dreieck: $F=0.698$; c) Buchstabe F: $F=0.171$

Aus diesen Beispielen wird bereits deutlich, dass der Formfaktor von runden zu „fraktaleren“ Strukturen abnimmt.

Kapitel 3

Experimentelle Methoden

3.1 Organische Molekularstrahldeposition - OMBD

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben wurden mittels organischer Molekularstrahldeposition hergestellt. Das Pentacen befindet sich (als Feststoff) in einem Aluminiumtiegel. Der Aluminiumtiegel wurde durch Heizen im Luftofen aufgrund der Oxidation passiviert. Dieser ist in einen organischen Verdampfer eingebaut. Der organische Verdampfer besteht aus einer Knudsen Zelle, einer Temperaturmessung und einem Shutter, der am Ende der Bedampfung wieder vor den Tiegel gefahren werden kann um unnötiges Austreten des organischen Materials zu verhindern.

3.1.1 Herstellung der Proben

Die Siliziumdioxid-Proben werden, vor Einbau in die UHV-Kammer, mit Ethanol (und Aceton) gereinigt. Nach dem Einbau und Abpumpen werden die Proben bei einem Druck von $< 10^{-7}$ mbar für jeweils 20 Minuten auf circa 500 K geheizt, um Verunreinigungen von der Substratoberfläche zu entfernen. Pentacen wird dann bei jeweils konstanten Substrattemperaturen aufgedampft. Die Temperatur wird hierbei mit einem Thermoelement, welches direkt auf der Probenoberfläche befestigt wurde, gemessen.

Die Rate wurde während des Aufdampfens nach regelmäßigen Zeitabständen mit dem Schwingquarz gemessen und gemittelt, um auftretende Schwankungen auszugleichen. Soweit nicht anders angegeben, betragen die Raten bei Herstellung der Proben etwa 4 Å/min. Über die Verschiebung der Resonanzfrequenz des Schwingquarzes lässt sich bei Kenntnis der Dichte des Adsorbates die Rate bestimmen. Die über die Rate erhaltenen Schichtdicken sind nominelle Schichtdicken, weil der Schwingquarz über seine gesamte Fläche mittelt. Da das Pentacen auf Siliziumdioxid ein Inselwachstum zeigt, kann ohnehin keine tatsächliche Schichtdicke angegeben werden.

Das nachträgliche Heizen der mit Pentacen bedampften SiO₂-Proben geschah dann auf unterschiedliche Weisen. Die ersten Proben wurden direkt unter dem AFM ge-

heizt. Aufgrund des Aufbaus ist hier ein Kontakt mit Luft unvermeidlich. Andere Proben wurden nachträglich im Vakuum (Druck $< 10^{-3}$ mbar) in Stufen geheizt, wurden vorher aber unter dem AFM untersucht und waren somit ebenfalls an Luft. Es wurden auch Proben direkt nach dem Aufdampfen im Vakuum nachträglich auf eine feste Temperatur geheizt. Bei diesem Verfahren wird eine Zwillingsbedampfung durchgeführt. Das heißt, zwei Proben werden bei gleicher Substrattemperatur von 340 K und möglichst gleicher Rate von etwa $4 \text{ \AA}/\text{min}$ mit einer nominellen Schichtdicke von 3 nm Pentacen bedampft. Nachdem der Bedampfungsvorgang abgeschlossen ist, wird eine der beiden Proben auf eine bestimmte Temperatur geheizt (in diesem Fall 368 K bzw. 358 K), die unterhalb der Desorptionstemperatur von Pentacen liegt (385 K auf SiO_2) [11]. Es sei erwähnt, dass hier und im Folgenden die Desorptionstemperatur als die Ansatztemperatur der Desorption bezeichnet wird, die in einem Massenspektrum ein signifikant höheres Intensitätssignal hervorruft, als das Umgebungsrauschen. Die andere Probe wird nicht geheizt, sondern später als Referenzprobe verwendet, um die möglichen Unterschiede im Wachstum zwischen geheizter und nicht geheizter Probe statistisch auswerten zu können. Der wesentliche Unterschied bei diesem Heizvorgang zu den beiden ersten ist, dass die Probe vor dem Heizen nicht an Luft war.

3.1.2 Verschiedene Waferqualitäten

Zum Einen bestand das verwendete Substrat aus einem (lange an Luft gelagerten) Silizium(100)-Wafer. Die Aufdampftemperatur und Dicke wurden so lange verändert, bis sich eine günstige Schichtdicke ergeben hat. Bei Raumtemperatur und einer nominellen Schichtdicke von 3 nm bildeten sich runde Inseln mit Höhen von 15 nm aus. Bei nomineller Schichtdicke von 30 nm war das Substrat vollkommen bedeckt und das Pentacen lagerte sich in großen pyramidenförmigen Kristalliten an.

An einer Probe mit 2 nm Schichtdicke und einer Aufdampftemperatur von 330 K wurden erste temperaturlaufgelöste Messungen unter dem AFM gemacht. Dabei wurde die Probe auf bestimmte Temperaturen geheizt und nach jeweils 10 Minuten die Resonanzfrequenz neu bestimmt.

Die Aufnahmen waren bis zu einer Temperatur von 380 K von guter Qualität. Mit zunehmender Temperatur verschlechterte sich jedoch die Auflösung der Bilder. Ab einer Temperatur von 438 K konnte dann keine Aufnahme mehr gemacht werden, aufgrund zu großer Störungen während des Scans. Erst nach Abkühlen der Probe war dies wieder möglich.

Nachdem die Qualität der Filme durch Störungen im AFM (z.B. Staubkörner) beeinträchtigt waren, wurde „neues“ Siliziumdioxid (ebenfalls von einem Si(100)-Wafer) verwendet. Dieses wurde „frisch“ gespalten und im Excikator gelagert. Die Proben wurden hier alle bei einer Substrattemperatur von 340 K hergestellt und hatten eine nominelle Schichtdicke von 2.5-3.5 nm.

Bei diesen Proben wurden alle oben aufgezählten Heizverfahren durchgeführt. Die ersten Proben wurden ebenfalls direkt unter dem AFM jeweils 15 Minuten bei bestimmter Temperatur geheizt und untersucht. Um Abbildungsfehler zu vermeiden, lässt man die Proben bei höheren Temperaturen als 380 K nach 15 Minuten wieder auf ca. 335 K abkühlen, bevor man einen Scan macht. Um eine auftretende Umordnung zu belegen, wurde hierbei möglichst derselbe 50 μm -Ausschnitt gescannt und dabei ein bestimmter Dendrit in Vergrößerung gescannt.

Im zweiten Verfahren heizt man die Probe, nachdem man sich einen Ausschnitt unter dem AFM herausgesucht und markiert hat, nicht unter dem AFM, sondern im Vakuum. Um auch hier eine Aussage bezüglich einer möglichen Umordnung treffen zu können, wird derselbe Ausschnitt für verschiedene Temperaturen gescannt.

3.2 AFM

Das Rasterkraftmikroskop (AFM bzw. SFM, engl.: atomic/scanning force microscopy) wurde zur Untersuchung der organischen Proben verwendet.

Das Konzept des AFM beruht auf dem Messen von Kräften zwischen einer Spitze und der Probenoberfläche. Die Spitze ist hierbei am Ende eines Kantilevers befestigt. Während der Messung wird mit der Spitze zeilenweise über die Probenoberfläche gerastert und mit Hilfe von Laserreflektion kann die Topographie der Oberfläche aufgenommen werden. Dazu wird ein Laserspot auf der probenfernen Seite des Cantilevers reflektiert, welcher dann auf eine segmentierte Photodiode trifft. Mit einer Photodiode, die in vier Bereiche aufgeteilt ist, erhält man nicht nur eine Information über die Krümmung, sondern auch über die Torsion des Cantilevers.

Es gibt verschiedene relevante Kräfte, die zwischen Probe und Spitze auftreten können. Die Pauli-Repulsion tritt bei geringen Abständen als abstoßende Kraft auf. Wenn Molekülorbitale überlappen, stoßen Elektronen mit gleichem Spin sich gegenseitig ab, falls alle anderen Quantenzahlen gleich sind. Bei organischen Molekülen bestimmt besonders die van der Waals Kraft den anziehenden Teil. Die van der Waals Kraft beschreibt die Wechselwirkung zwischen neutralen Molekülen, die kein statisches Dipolmoment besitzen. Durch Fluktuationen in der Ladungsverteilung in einem Molekül bilden sich temporär Dipolmomente aus, diese induzieren wiederum in anderen Molekülen Dipole. Daraus erfolgt dann eine Anziehung. Die van der Waals-Kräfte sind langreichweitige, dafür aber eher schwache Kräfte. Sie spielen besonders in organischen Materialien eine große Rolle.

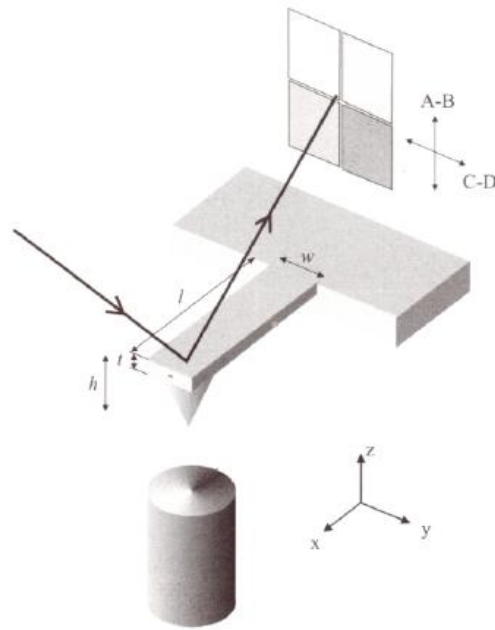


Abb. 3.1: Funktionsprinzip AFM: Laserstrahl wird von Kantileverrückseite zur segmentierten Photodiode reflektiert. Das AB-Signal ist proportional zur Normalkraft, das CD-Signal proportional zur Torsionskraft [12].

3.2.1 Tapping-Mode

Das AFM kann in unterschiedlichen Modi betrieben werden. Im Folgenden wird der Tapping-Mode kurz erläutert, da ausschließlich dieser zur Untersuchung der Pentacen-Proben verwendet wurde.

Im Tapping-Mode oszilliert der Cantilever normal zur Probe. Dabei kommt es immer nur zu einem kurzen Kontakt zwischen Spitze und Probe. Die Anregung findet nahe der Resonanzfrequenz statt. Als Regelsignal wird die Änderung der Schwingungsamplitude eingesetzt. Im Tapping-Mode treten sowohl anziehende als auch repulsive Kräfte auf. In diesem Modus kann man aufgrund der geringen lateralen Kräfte auch über „weiche“ Proben (also organische Proben wie in diesem Fall Pentacen) scannen, ohne sie zu zerstören. Im Contact-Mode würden dagegen die Pentacen-Schichten von der Spitze beim Rastern über die Probe einfach weggeschoben, sodass man die Molekülschicht an dieser Stelle zerstört.

3.2.2 Temperatur aufgelöste Messungen mit dem AFM

In dieser Arbeit wurden Aufnahmen mit dem AFM gemacht, bei denen die Probe direkt auf dem Probenhalter geheizt wurde. Dabei sind gewisse Dinge beim Scannen zu beachten.

Aufgrund der thermisch zugeführten Energie dehnt sich die Probe aus. Das bedeutet,

dass man während des Heizens die Spitze von der Probenoberfläche entfernen muss, um einen Abbruch der Spitze zu verhindern (siehe Abb. 3.2a)). Die erwartete Ausdehnung des Siliziums beträgt für einen Temperaturanstieg von 150 K bei einer Dicke von 1 mm und einem Ausdehnungskoeffizienten von $2 \cdot 10^{-6}$ 1/K etwa $0.3 \mu\text{m}$. Die Änderung der Motorposition lässt sich somit nicht nur mit der Ausdehnung des Siliziums beschreiben, sondern könnte eine Folge der Ausdehnung des Kupferheizblockes und der Piezokristalle sein.

Beim Heizen der Probe erwärmt sich der Kantilever und somit auch die Spitze. Damit ist eine Veränderung der Resonanzfrequenz verbunden. Da sich die Resonanzfrequenz nur langsam verschiebt, spielt dies bei geringen Temperaturveränderungen keine große Rolle (siehe Abb. 3.2b)).

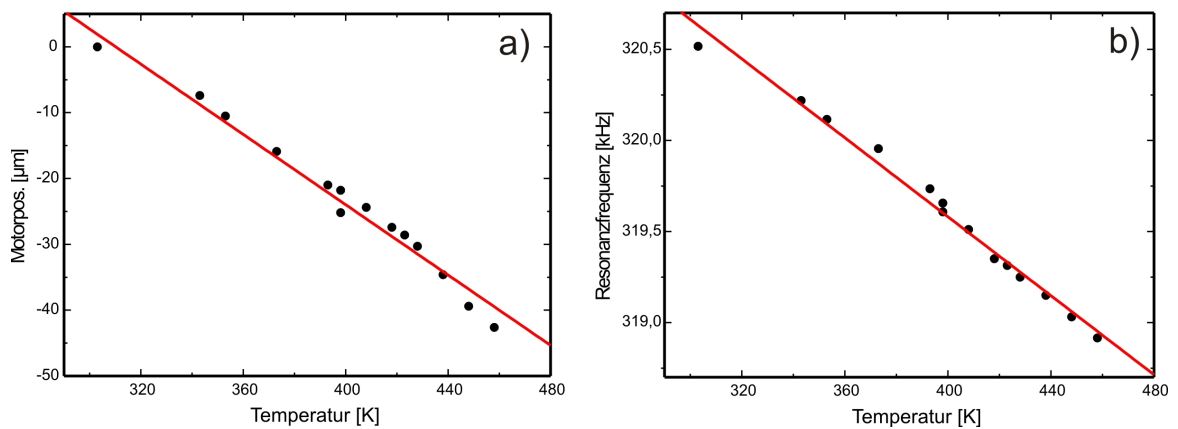


Abb. 3.2: Abhängigkeit der a) Motorposition ($y = -0.267 \mu\text{m/K} \cdot x + 82.81 \mu\text{m}$) und b) der Resonanzfrequenz von der Temperatur ($y = -0.011 \text{ kHz/K} \cdot x + 323.9 \text{ kHz}$)

Man befindet sich dann auf der Flanke des Peaks der Resonanzfrequenz und eine Aufnahme ist möglich. Bei einer vollen Halbwertsbreite von etwa 0.8 kHz ist somit das Scannen mit dergleichen Resonanzfrequenz bis zu einer Temperaturveränderung von etwa 40 K möglich. Bei größeren Temperaturdifferenzen kann es jedoch vorkommen, dass sich die Resonanzfrequenz soweit verschoben hat, dass der Peak außerhalb der ursprünglichen Anregung liegt. Scannt man nun über die Probe, bekommt man keine Information über Topographie bzw. Phase. Die Resonanzfrequenz sollte daher vor dem Scan neu bestimmt werden.

Außerdem kann sich beim Heizen der Probe der Laserspot vom Zentrum des Fadenkreuzes bewegen. Die Photodiode muss dann nachgeregelt werden. Des Weiteren wurde die Temperaturmessung am AFM überprüft. Dazu wurde auf einer Siliziumdioxid-Probe ein Thermoelement befestigt. Während des Heizens wurden beide angezeigten Temperaturen nach 10-Grad-Schritten festgehalten. Alle in dieser Arbeit angegebenen Temperaturen durch AFM-Messungen beruhen auf dieser Vergleichsmessung. Ebenso wurde die Temperaturmessung der „kleinen“ Vakuumanlage überprüft. Dazu wurde (wie oben) auf einer Siliziumdioxid-Probe ein Thermoelement

befestigt und die unterschiedlichen Temperaturen schrittweise festgehalten. Auch hier beruhen alle Temperaturangaben auf dieser Vergleichsmessung (siehe Abb. 3.3).

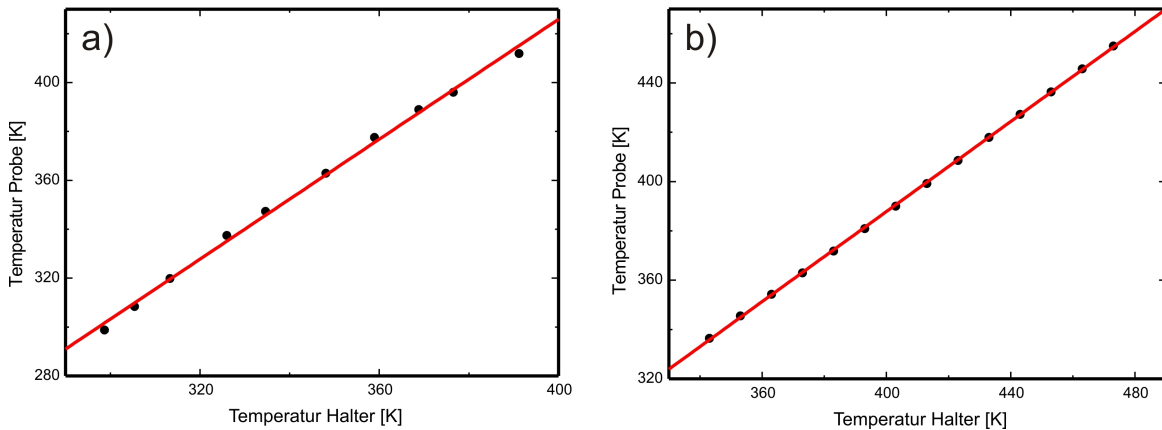


Abb. 3.3: Temperaturkontrolle: a) in Vakuumkammer ($y = 1.23 \cdot x - 64.7 \text{ K}$); b) direkt unter AFM ($y = 0.91 \cdot x + 22.5 \text{ K}$)

3.2.3 Reproduzierbare Positionierung der AFM-Spitze

Bei der direkt geheizten Probe „verschiebt“ sich die Stelle aufgrund des thermischen Drifts. Um die gleiche Stelle bei höherer Temperatur wiederzufinden, scannt man daher erst einen großen Bereich um dort markante Bereiche zu erkennen und sich anhand dieser zu orientieren.

Ein Problem dabei ist bzw. zum thermischen Drift kommt hinzu, dass beim Entfernen und Annähern des Kantilevers die Scanposition zusätzlich verändert wird. Daher sollte man auch die Spitze nicht weiter als nötig von der Probe entfernen. Mit Hilfe von Abb. 3.2 wurde versucht, diesen Effekt möglichst klein zu halten.

Bei der Probe, die im Vakuum in Schritten hochgeheizt wird, besteht das Problem, dass die Probe immer wieder neu ins AFM eingebaut werden muss. Um dort dieselbe Stelle wiederfinden zu können, muss man daher die Probe markieren. Dazu wurde mit Bleistift (Graphit) die Probe nach dem Bedampfen (in diesem Fall mit einer „1“) markiert, um die richtige Orientierung sicherzustellen. Unter dem optischen Mikroskop des AFMs wird dann eine eindeutige Stelle gesucht und die Position der Spitze vermessen, um bei wiederholtem Scannen den ausgewählten Bereich wiederzufinden (siehe Abb. 3.4). Auch hier wird jeweils ein großer Übersichtsscan gemacht (gewöhnlich $50\mu\text{m}$), um sich zu orientieren und dann den ausgewählten Bereich zu vergrößern. Hierbei ist das „Creeping“ (der Piezo-Kristalle) zu beachten. Diese schaffen es nicht, die Spitze direkt über den angegebenen Scanbereich zu positionieren. Man muss daher die Koordinaten der Scanposition - oft mehrmals - nachregeln (meist doppelte bzw. dreifache Distanz), um wirklich die gewünschte Stelle zu scannen. Um eine Hysterese durch die Piezokristalle zu vermeiden, wird der Scan nach ein paar Zeilen neu gestartet.

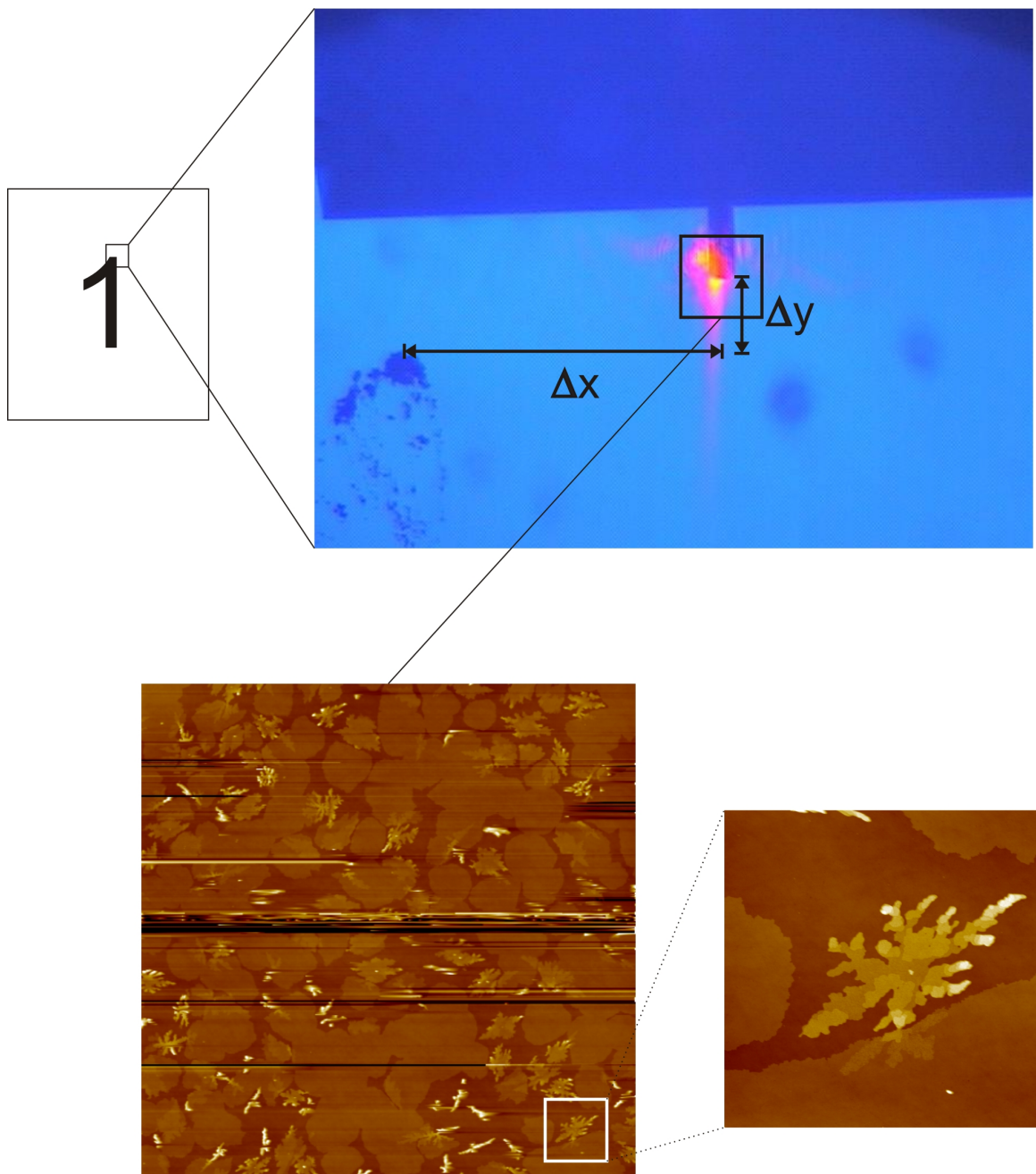


Abb. 3.4: Übersichtsskizze zum Wiederfinden einer Stelle bei Proben, die außerhalb des AFMs (hier im Vakuum) geheizt werden

3.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der AFM-Bilder wurden mit dem Programm SPIP (Scanning Probe Image Processing) durchgeführt. Mit diesem Programm ist es unter anderem möglich, Informationen über einzelne Partikel zu erlangen. In dieser Arbeit wurde besonders die Particle and Pore Analysis des Programmes genutzt. Mit ihr

lassen sich Parameter wie Fläche, Umfang und Höhe der detektierten Partikel oder auch die Bedeckung bestimmen. Man nutzt hierzu die Threshold- bzw. Advanced-Threshold-Methode, um die einzelnen Partikel zu erkennen. Dabei sucht man sich ein Threshold-Level, bei dem möglichst alle Partikel erkannt werden und wenig Fehlstellen als Partikel detektiert werden. Zusätzlich kann man Filter nutzen, um die restlichen Fehlstellen aus der Partikelanalyse zu nehmen. Zur Auswertung nutzt man dann die statistischen Verteilungen der gewünschten Größe.

Bei Gwyddion (freie Software zur Analyse von AFM-Bildern) lässt sich die fraktale Dimension über das Box-counting bzw. Cube-counting Verfahren (da hier 3D-Inseln vorliegen) ermitteln. Mit Hilfe von SPIP lässt sich ebenfalls die fraktale Dimension eines Ausschnittes bestimmen. Dazu wird eine Roughness-Analyse des gewählten Bereiches durchgeführt.

Kapitel 4

Ergebnisse

4.1 Einfluss des Substrats auf das Wachstum

Während dieser Arbeit stellte sich heraus, dass die Qualität des verwendeten Substrates einen großen Einfluss auf die Anordnung des aufgedampften Pentacens hat. Die Proben, bei denen „altes“ Siliziumdioxid als Substrat verwendet wurde, zeigten keinerlei dendritisches Wachstum, welches bei Pentacen auf SiO_2 eigentlich erwartet wird (Abb. 4.1). Stattdessen bilden sich runde Inseln aus, die je nach Schichtdicke zu einer unterschiedlichen Bedeckung des Substrats führen. Bei einer nominellen Schichtdicke von 3 nm haben diese Inseln eine Höhe von ebenfalls durchschnittlich 3 nm. Die Proben mit neuem Siliziumdioxid weisen dagegen neben runden Inseln das erwartete dendritische Wachstum [7] auf.

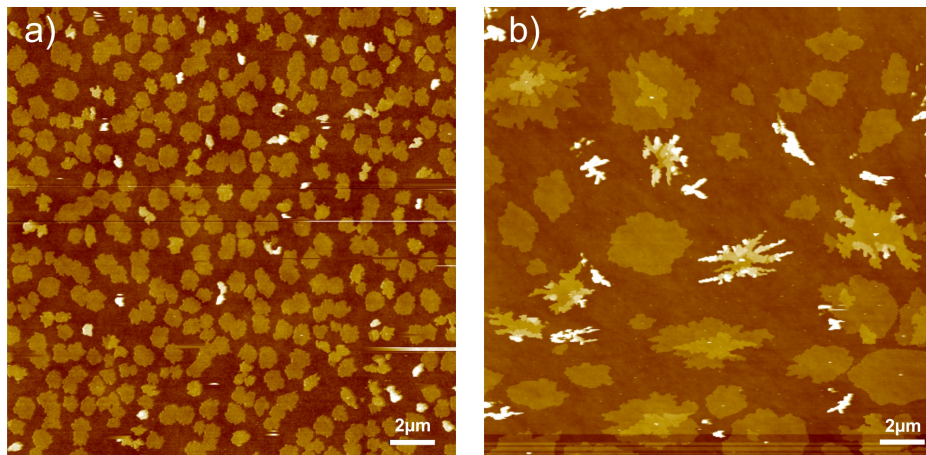


Abb. 4.1: Abhängigkeit vom verwendeten Substrat (jeweils $20\mu\text{m}$ -Ausschnitt): a) „altes“ SiO_2 : runde Inseln, keine Dendriten (Probe wurde bei 330 K hergestellt, bei einer nominellen Dicke von $19,5 \text{ \AA}$); b) „neues“ SiO_2 : neben runden Inseln auch fraktales Wachstum (Herstellung bei 340 K und nominelle Dicke von 28 \AA)

Zu beachten ist, dass die gefundenen Dendriten immer aus mehreren Monolagen bestehen. Es wurde kein Dendrit gefunden, der direkt auf dem Substrat nur eine Monolage hoch war (siehe Abb. 4.2). Die gefundenen Stufen auf den Dendriten haben eine

durchschnittliche Höhe von 1.6 ± 0.2 nm, was mit dem theoretischen Ebenenabstand für die Dünnschicht-Phase gut übereinstimmt.

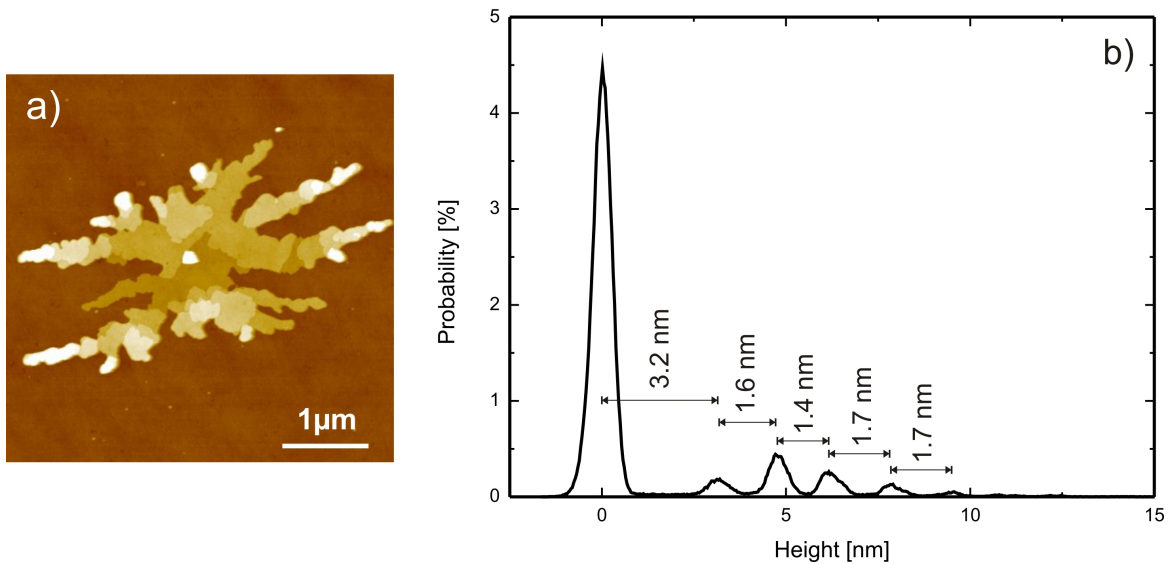


Abb. 4.2: a) „typischer“ Dendrit; b) Histogramm von Bildausschnitt a)

Die Inseln weisen dagegen eine Höhe von 2.2-2.4 nm auf, die sich weder durch die Dünnschicht-Phase noch durch die Campbell-Phase erklären lässt, wenn man von aufrechtem Wachstum ausgeht.

4.2 Morphologische Veränderungen

4.2.1 Unter AFM (an Luft) geheizte Proben

Bei den direkt an Luft (im AFM) geheizten Proben zeigte sich keine morphologische Umordnung. Sowohl mit „altem“ als auch „neuem“ Siliziumdioxid als Substrat, zogen sich die Pentacenmoleküle an der Oberfläche nicht (wie ursprünglich erwartet) zu blockartigen Strukturen zusammen. Das heißt, weder die runden Inseln noch die Dendriten veränderten ihre Struktur, sondern desorbierten. Bei zunehmender Temperatur ließ sich dagegen beobachten, dass die runden Inseln bereits bei geringerer Temperatur von der Oberfläche desorbierten als Dendriten. Bei der Untersuchung der Dendriten traten teilweise besonders bei höheren Temperaturen unter dem AFM Probleme bei der Abbildung auf. Beim Scan über kleinere Ausschnitte neigte das System häufig zu Doppelspitzen. Teilweise wurden beim Scannen über den Dendriten besonders hohe Stellen beim Kontakt mit der Spitze abgetragen und die Struktur teilweise zerstört.

In Abbildung 4.3 b) erkennt man eine Störung der Aufnahme. Daher wurden alle weiteren Scans nach Abkühlen der Probe auf 340 K durchgeführt, um weitere

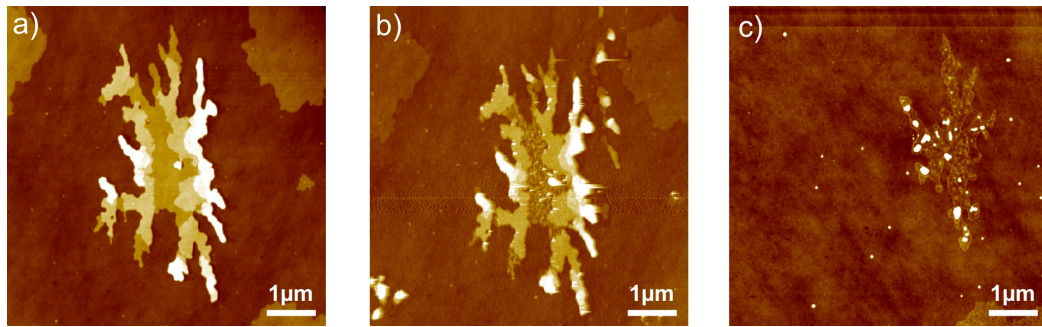


Abb. 4.3: AFM-Aufnahmen eines 28 Å Pentacenfilms auf SiO₂ bei einer Aufdampftemperatur von 340 K (6.5 μm-Ausschnitt): Dendrit a) bei 300 K, b) 380 K, c) 433 K

Störungen, beispielsweise in Form von Doppelspitzen oder Abtragungen (rechte Seite in Abb.4.3b)), zu vermeiden.

4.2.2 Schrittweise im Vakuum geheizt

Auch bei der Probe, die vor dem Heizen in Vakuum erst an Luft war, ließen sich keine Umordnungen der Dendriten, sondern ausschließlich Desorption der Moleküle erkennen (siehe Abb. 4.4).

Auch hier war zu beobachten, dass die Inseln schneller desorbieren als die Dendriten (vergleiche Abb.4.4b) und c)). Die Desorption der Dendriten war hier allerdings genauer zu betrachten, da die Probe bei der Untersuchung mit dem AFM wieder bei Raumtemperatur war und somit keine Abbildungsfehler durch das Erwärmen der Probe bzw. der Spitze entstehen. Auch Doppelspitzen treten seltener auf als bei der direkt geheizten Probe. Über die Bedeckung kann man beispielsweise eine Information über die Desorption bekommen. Hierzu wurde in Abb. 4.5 die Bedeckung, die man über die durchgeführte Partikelanalyse bekommt, über die Temperatur aufgetragen.

Dabei setzt die Desorption der runden Inseln bereits bei etwa 383 K ein. Die Dendriten zeigen dagegen erst bei 408 K eine erste Desorption. Es ist zudem erstaunlich, dass bei Temperaturen von über 450 K noch Schichten auf dem Substrat sind, obwohl die Desorptionstemperatur bei 385 K liegt. Des Weiteren ist die verhältnismäßig langsame Desorption bei großen Temperaturunterschieden zu beachten. Vergleicht man sie zum Beispiel mit TDS-Messungen [2], so lässt sich hier ein vollkommen anderes Desorptionsverhalten beobachten.

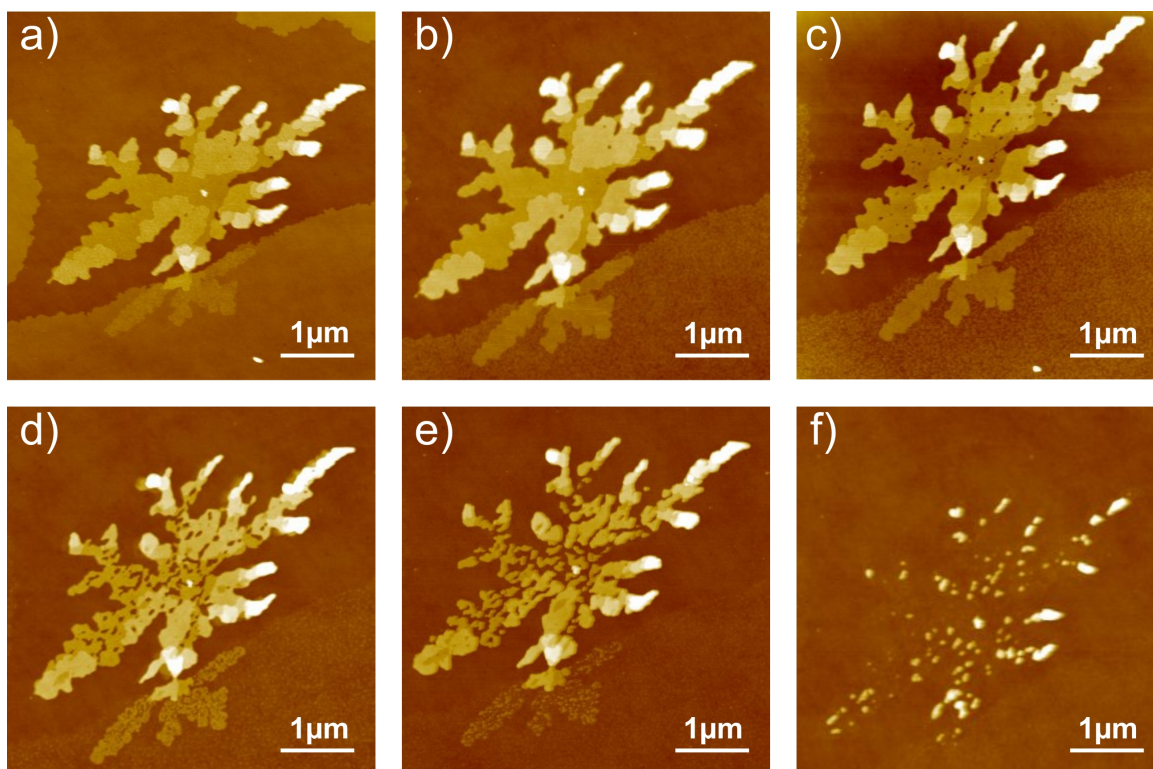


Abb. 4.4: $5\mu\text{m}$ -Ausschnitte einer Probe (Bedampfungstemperatur 340 K, nominelle Schichtdicke 3 nm) bei unterschiedlichen Temperaturen ($t=15$ min.): a) 296 K, b) 393 K, c) 408 K, d) 435 K, e) 448 K, f) 490 K

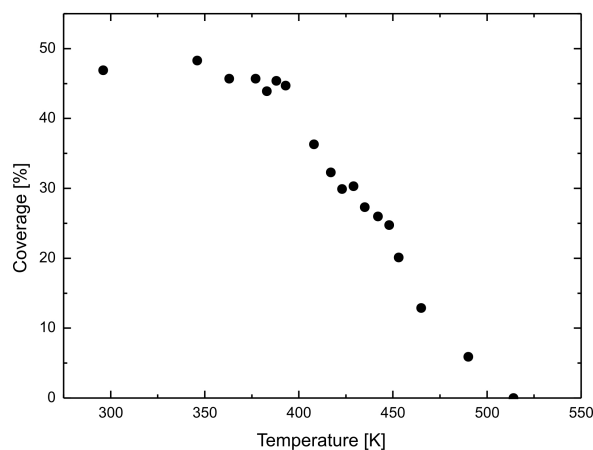


Abb. 4.5: Ab 408 K bilden sich erste Löcher im Dendriten, bei 423 K ist die unterste Schicht fast komplett desorbiert.

4.2.3 Direkt im Vakuum geheizt

Die direkt im Vakuum geheizte Probe zeigte dagegen sehr wohl Schichtänderungen. In Abb. 4.6 erkennt man, dass die Strukturen auf der Substratoberfläche viel kompakter

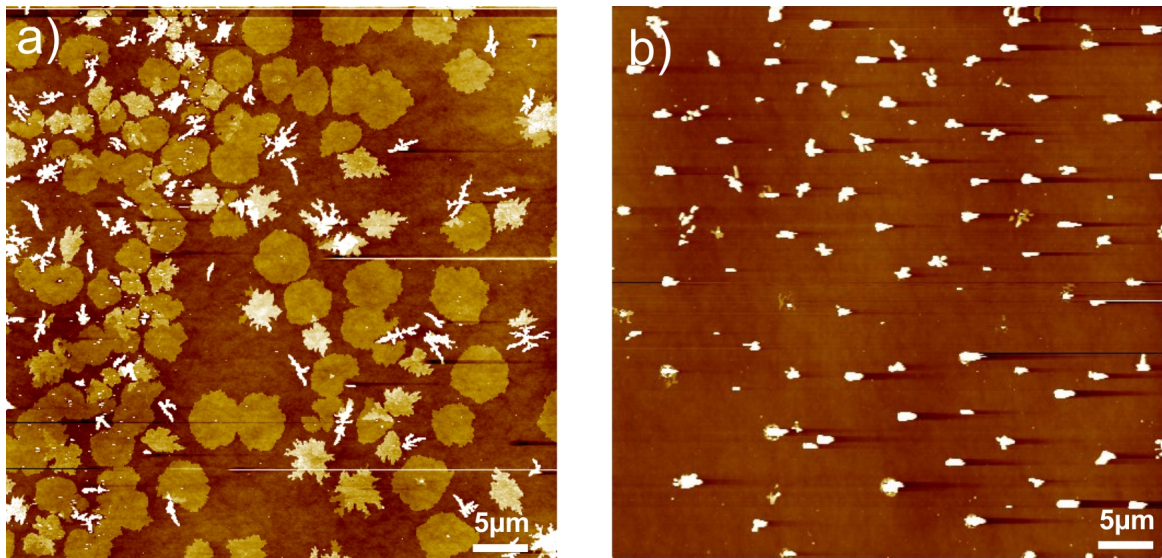


Abb. 4.6: Vergleich der Zwillingsproben ($50\ \mu\text{m}$ -Ausschnitte): Beide Proben wurden bei 340K bedampft und haben eine nominelle Dicke von 3.5 nm; a) Referenzprobe, Bedeckung: 35.4%; b) 15 Minuten auf 368 K geheizt, Bedeckung: 4.2%

ter im Vergleich zur Referenzprobe sind. Auch die Bedeckung hat abgenommen, was mit der ursprünglichen These übereinstimmt, dass eine thermisch angeregte Entnetzung stattfindet. Allerdings hängt dies auch damit zusammen, dass alle runden Inseln scheinbar von der Substratoberfläche desorbiert sind (obwohl die Temperatur von 368 K beim Nachheizen unter der Desorptionstemperatur von Pentacene liegt), während die Dendriten noch auf dem Substrat bleiben.

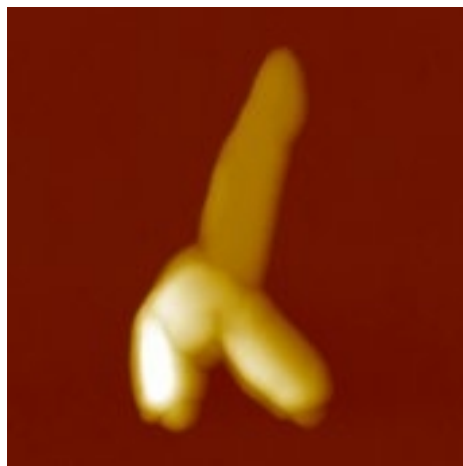


Abb. 4.7: $1\ \mu\text{m}$ -Ausschnitt eines nachgeheizten Dendriten (Höhe 80 nm)

Die einzelnen AFM-Scans wurden ebenfalls mit Hilfe der Partikelanalyse in SPIP ausgewertet. Dazu wurden die einzelnen Partikel aus mehreren Ausschnitten der Referenzprobe mit der nachträglich geheizten Probe verglichen. In Abbildung 4.8 ist die

Verteilungsfunktion der Fläche beziehungsweise der Höhe von beiden Proben aufgetragen.

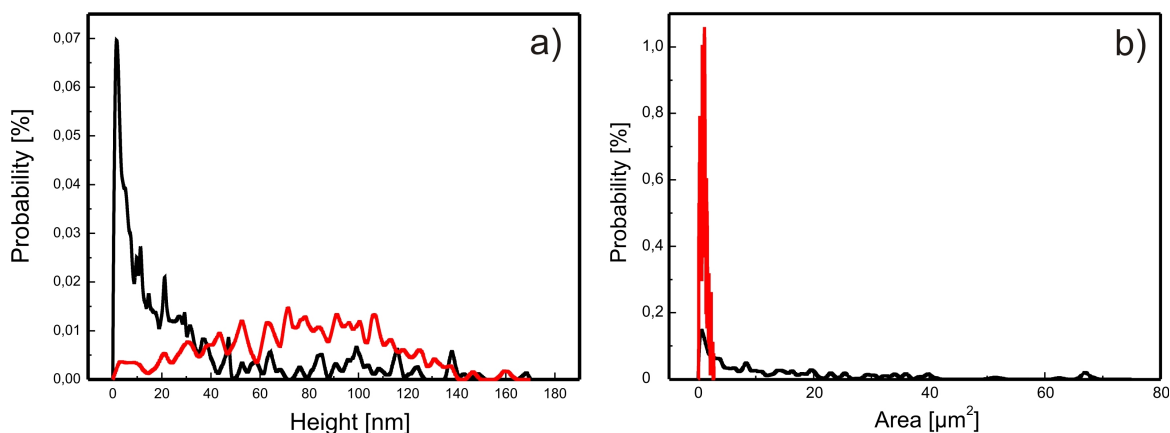


Abb. 4.8: Vergleich von a) Höhen- und b) Flächenverteilung der hergestellten Zwillingsproben (rot: auf 368 K nachgeheizte Probe ($t = 15\text{min.}$); schwarz: Referenzprobe)

In Abbildung 4.8 lässt sich somit erkennen, dass die Flächen der Pentaceneinseln kleiner geworden sind, dafür aber ihre Höhen zugenommen haben. Das entspricht genau dem Verhalten, welches bereits bei den XPS-Messungen von D. Käfer et al. [2] gefunden wurde.

Es wurden noch weitere Zwillingsproben hergestellt, um die Temperaturabhängigkeit zu untersuchen. Abb. 4.9 zeigt Zwillingsproben, die bei den gleichen Bedingungen wie in Abb. 4.8 hergestellt wurden. Allerdings wurde die eine Probe nach dem Bedampfen mit Pentacene nur auf 358 K geheizt (wieder für eine Zeitspanne von 15 Minuten).

Man erkennt in Abb. 4.9b), dass die Umordnungen wesentlich kleiner sind als in Abb. 4.6. Trotzdem sieht man einen deutlichen Unterschied in der Bedeckung. Diese ist von 90.3% auf 57.2% abgesunken. Hier sei auch bemerkt, dass es den Anschein hat, als ob die runden Inseln bereits bei dieser Temperatur anfangen zu desorbieren und das die Bedeckung somit nicht nur durch thermisch aktivierte Umordnung abgenommen haben kann.

Vergleicht man Abb. 4.9 mit Abb. 4.6 stellt man fest, dass die beiden Referenzproben eine unterschiedliche Bedeckung haben, obwohl die gleichen Parameter bei der Bedampfung gewählt wurden. Man sieht daran, dass eine Referenzprobe sehr wichtig zur Auswertung ist, da nur Proben vergleichbar sind, die beim gleichen Bedampfungsvorgang hergestellt wurden.

Wertet man das Histogramm (siehe Abb. 4.10) aus, wird anhand der unterschiedlichen Höhenverteilung deutlich, dass auch hier eine Entnetzung eingesetzt hat. Der Substratpeak (bei der Höhe 0) ist größer geworden und die Höhe der Pentacenschichten

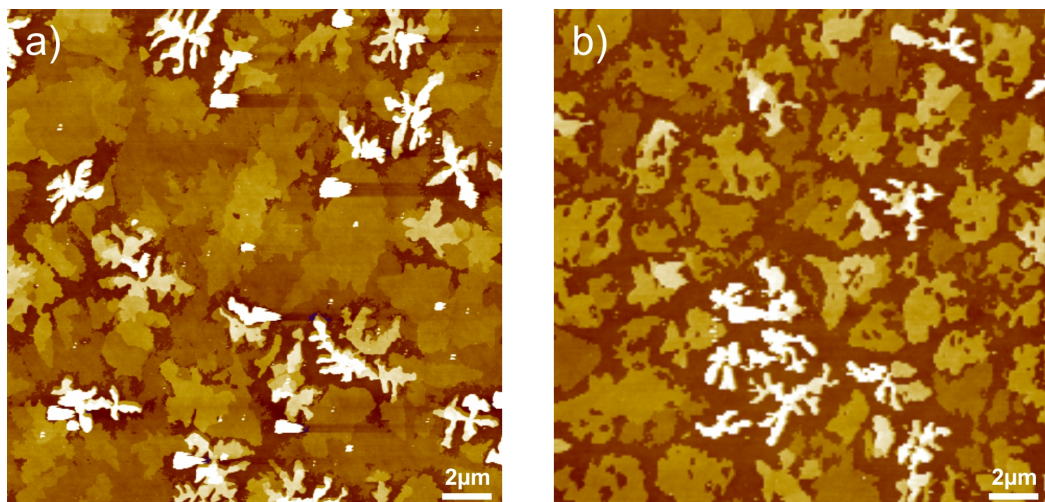


Abb. 4.9: Vergleich der Zwillingsproben (beide Proben wurden bei 340 K bedampft und haben eine nominelle Dicke von 3,5 nm), jeweils 20 μm -Ausschnitte; a) Referenzprobe, Bedeckung: 90,3%; b) 15 Minuten auf 358 K geheizt, Bedeckung: 57,2%

hat sich etwas nach rechts verlagert. Auch lässt sich in diesem Histogramm erkennen, dass keine wirkliche erste Monolage auftritt. Dieses Phänomen trat bereits bei den anderen untersuchten Proben auf.

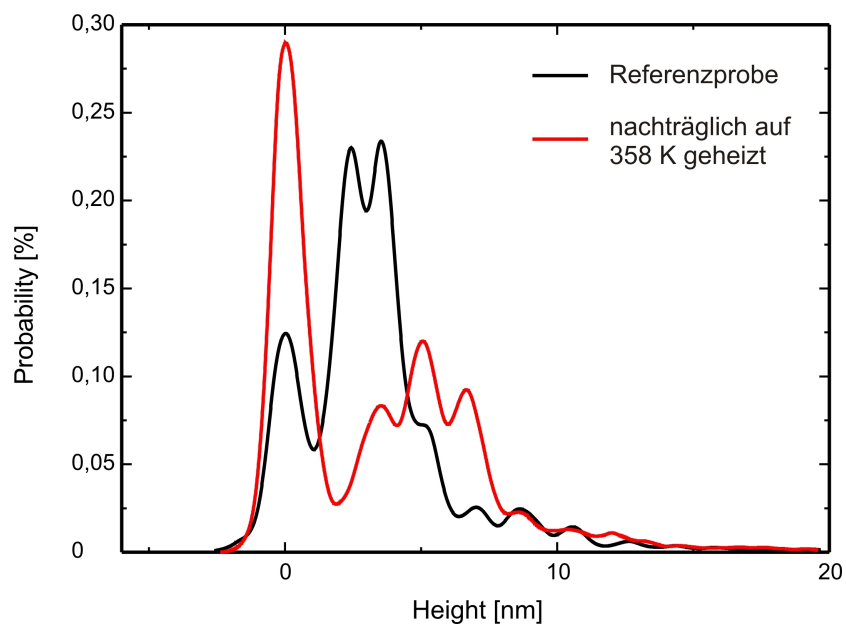


Abb. 4.10: Histogramm der Zwillingsproben, wobei eine nur 15 Minuten auf 358 K geheizt wurde.

4.3 Fraktale Größen

4.3.1 Fraktale Dimension

Die Fraktale Dimension wurde mit Gwyddion nach dem „Cube-Counting“ Verfahren ermittelt. Für Dendriten auf Proben, die nicht nachträglich geheizt wurden, ergab sich ein Mittelwert von:

$$d_F = 2.24$$

Bei der auf 368 K nachgeheizten Probe ergaben sich für die fraktale Dimension von einzelnen Dendriten als Mittelwert:

$$d_F = 2.13$$

Der Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass bei der nachträglich im Vakuum geheizten Probe sich die Partikel zusammengezogen haben und dadurch nur auf einem kleinen Teil der Oberfläche eine 3D-Struktur ist, während die Dendriten auf den nicht nachträglich geheizten Proben eine größere „Unebenheit“ darstellen. Die erhaltenen Werte spiegeln das entnetzende Verhalten der Schichten wieder.

Wertet man die fraktale Dimension mit anderen Verfahren aus (z.B. der Roughness-Analyse in SPIP), zeigen sich die gleichen Tendenzen. Allerdings lassen sich für unterschiedliche Verfahren die Werte der fraktalen Dimensionen nicht miteinander vergleichen. Sie hängen stark von der verwendeten Analyse ab.

4.3.2 Formfaktor

Zur genaueren Analyse (vorallem der Dendriten) der auf 368 K geheizten und der Referenzprobe wurde bei der auf 368 K geheizten Probe eine Partikelanalyse durchgeführt. Dazu wurden mehrere Bereiche sowohl auf der Referenzprobe als auch auf der nachgeheizten Probe (wie auch bei der Höhen- und Flächenstatistik in Abb. 4.8) ausgewertet. Hierbei wurde insbesondere die Entnetzung untersucht. Das bedeutet, es wurde vor allem eine „2D-Information“ durch den Formfaktor (Gl. 2.4) untersucht.

Die erhaltenen Werte für Umfang und Fläche wurden für die einzelnen Partikel linear angefügt, um durch die Steigung, die dem Formfaktor entspricht, eine mögliche Tendenz zu erhalten. Der Formfaktor der Referenzprobe beträgt:

$$F = 0.12$$

Für die nachträglich auf 368 K geheizte Probe erhält man hingegen einen Formfaktor von:

$$F = 0.19$$

Führt man das gleiche Verfahren bei der auf 358 K geheizten Probe durch, erkennt man, dass sich hier der Formfaktor nur minimal ändert (siehe Abb. 4.12). Das bedeutet, dass bei geringer Umbildung, die nach dem Histogramm in Abb. 4.10 eingesetzt hat, der Formfaktor hier nicht sensitiv genug ist, um diese anzeigen zu können.

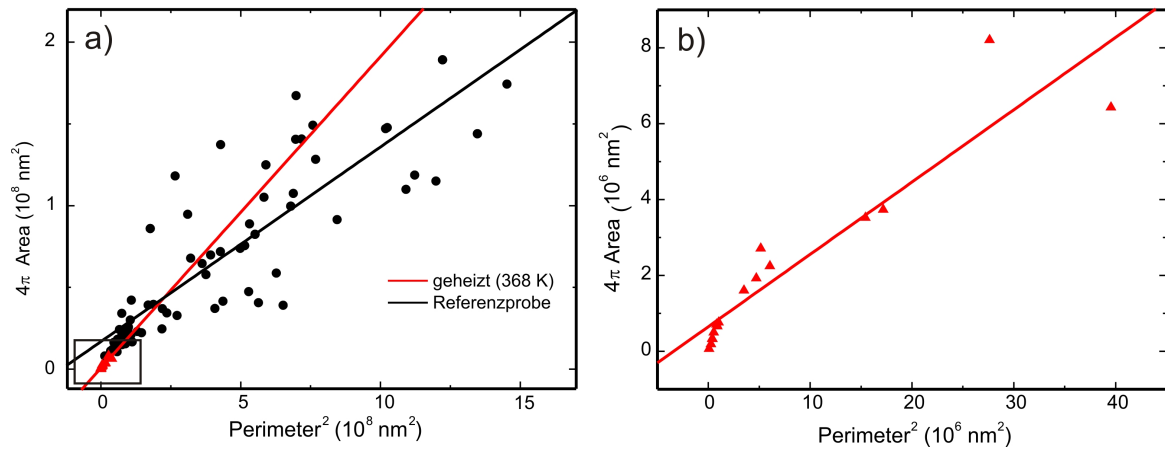


Abb. 4.11: a) Formfaktoren beider Proben; b) Ausschnitt der nachgeheizten Probe

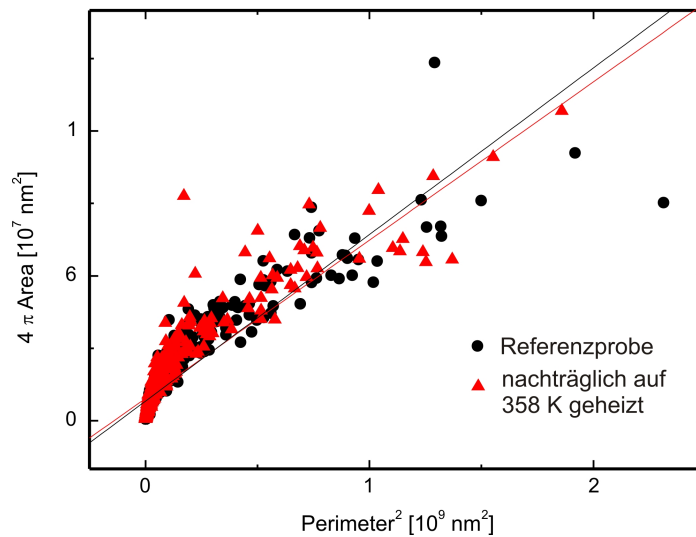


Abb. 4.12: Formfaktoren der Zwillingbedampfung bei 358 K: nachträglich geheizte Probe (rot): $F=0.066$, Referenzprobe (schwarz): $F=0.069$

Da sich die Steigung bei der auf 368 K nachgeheizten Probe, wie erwartet, unterscheidet, stellt der Formfaktor eine geeignete Größe dar, um die Entzettelung einer Oberfläche beschreiben zu können. Im Gegensatz zur Bestimmung der fraktalen Dimension kann man mit Hilfe der Partikelanalyse im AFM-Bild bei allen Dendriten die erhaltenen Größen einzeln auswerten und man erhält viele Messwerte, die einen Trend deutlicher anzeigen. Um allerdings eine gewichtete Aussage machen zu können, muss man mehrere, möglichst homogene Proben bei unterschiedlichen Temperaturen untersuchen, um dann die unterschiedlichen Formfaktoren zueinander in Beziehung setzen zu können.

4.4 Fazit

Es wurden für das selbe Substrat drei unterschiedliche Messprozesse gewählt, die sich - wie sich herausstellt - deutlich in der Auswirkung auf die Morphologie unterscheiden. Nicht nur das verwendete Substrat hat eine Auswirkung auf die Anordnung, sondern auch das Vorgehen beim Heizen.

Während die Proben, die vor dem Heizen an Luft waren, keine Umordnung zeigen, verändert sich die Struktur der im Vakuum direkt geheizten Probe deutlich. Dies legt den Schluss nahe, dass sich möglicherweise eine „Schutzschicht“ über die Pentacenmoleküle legt, wenn diese an Luft sind, und diese Schicht eine Umordnung verhindert. Auch kann man eine mögliche Oxidation der Pentacenmoleküle zu Pentacenquinonmolekülen in Betracht ziehen, die die Entnetzung möglicherweise hemmt.

Daneben bleibt die Frage offen, wie die Höhe von 2.2-2.4 nm der „runden Inseln“ zu erklären ist. In der Literatur findet sich kein vergleichbarer Ebenenabstand, der diese Höhe für aufrechtes Wachstum erklären könnte. In Frage können somit mehrstufige Schichten kommen. Zudem scheinen die runden Inseln im Vergleich zu den Dendriten deutlich schwächer an das Substrat gebunden zu sein.

Es bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse der XPS-Messung zumindest für den Fall des Heizens ohne Luftkontakt bestätigt werden können.

Kapitel 5

Ausblick

Als Größe zur Beschreibung einer nachträglich thermisch-aktivierten Entnetzung hat sich in dieser Arbeit der Formfaktor geeignet. Um eine Aussage über die Abhängigkeit des Formfaktors von der Temperatur machen zu können, sollten allerdings noch mehrere verschiedene Temperaturen untersucht werden. Vor allem kommen hier Temperaturen im Bereich von 360 K bis etwa 375 K in Frage. Dabei ist es notwendig Zwillingsproben herzustellen und nur eine der beiden Proben nachträglich zu heizen, um eine Kontrolle über anfängliche Schichtdicke und Schichtqualität (durch die Referenzprobe) zu bekommen. Zudem wurde in dieser Arbeit nur die nachträgliche Heiztemperatur verändert, die Zeitdauer jedoch konstant gehalten. Eine weitere Möglichkeit wäre, nun bei konstanter Temperatur verschiedene Zeitspannen zu heizen und die Wachstumsveränderung in Abhängigkeit von der Zeit zu untersuchen.

Bei homogenen Schichten und geeigneter Bedeckung lässt sich die fraktale Dimension der Dendriten ebenfalls als charakteristische Größe bestimmen.

Außerdem bietet die Abhängigkeit des Wachstums vom verwendeten Substrat und dessen Qualität eventuell eine Möglichkeit, durch gezielte „Defekte“ das Wachstum der Schichten zu beeinflussen.

Des Weiteren stellt sich die Frage, ob sich andere organische Schichten beim nachträglichen Heizen ebenso wie Pentacen verhalten. Also, ob sie nur dann eine thermisch aktivierte Entnetzung und Umordnung zeigen, wenn sie direkt im Vakuum nachgeheizt werden und vorher keinen Luftkontakt hatten. Außerdem wäre es interessant mit XPS-Messungen zu untersuchen, ob das beobachtete entnetzende Verhalten ausbleibt, wenn die Proben vorher Luftkontakt hatten.

Literaturverzeichnis

- [1] R. Ruiz; D. Choudhary; B. Nickel; T. Toccoli; K.-C. Chang; A. C. Mayer; P. Clancy; J. M. Blakely; R. L. Headrick; S. Iannotta; G. G. Malliaras. Pentacene thin film growth. *Chem. Mater.*, 16:4497–4500, 2004.
- [2] D. Käfer; C. Wöll; G. Witte. Thermally activated dewetting of organic thin films: the case of pentacene on sio2 and gold. *Appl. Phys. A*, 95:273–284, 2009.
- [3] T. W. Kelley; D. V. Murphy; P. F. Baude; T. P. Smith; T. D. Jones. High performance organic thin film transistors. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, L6.5:771, 2003.
- [4] R. B. Campbell; J. M. Robertson; J. Trotter. The crystal structure of hexacene and a revision of the crystallographic data for tetracene and pentacene. *Acta Cryst.*, 15:289, 1962.
- [5] T. Siegrist; C. Kloc; J. H. Schoen; B. Battlog; R. C. Haddon; S. Berg; G. A. Thomas. Enhanced physical properties in a pentacene polymorph. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 40(9):1732, 2001.
- [6] S. Schiefer; M. Huth; A. Dobrinevski; B. Nickel. Determination of the crystal structure-induced pentacene polymorphs in fiber structured thin films. *J. Am. Chem. Soc.*, 129:10316, 2007.
- [7] F.-J. Meyer zu Heringdorf; M. C. Reuter; R. M. Tromp. Growth dynamics of pentacene thin films. *Nature*, 412:517, 2001.
- [8] Sirapat Pratontep; Martin Brinkmann; Frank Nüesch; Libero Zuppiroli. Correlated growth in ultrathin pentacene films on silicon oxide: Effect of deposition rate. *Physical Review B*, 69:165201 (3–4), 2004.
- [9] A.-L. Barabási; H.E. Stanley. *Fractal Concepts in Surface Growth*. Cambridge University Press, 1995.
- [10] H. Zeitler; D. Pagon. *Fraktale Geometrie - Eine Einführung*. Vieweg, 2000.
- [11] D. Käfer. *Characterization and Optimization of Growth and Electronic Structure of Organic Thin Films for Application in Organic Electronics*. PhD thesis, Ruhr-Universität Bochum, 2008.

- [12] E. Meyer; H. J. Hug; R. Bennewitz. *Scanning Probe Microscopy*. Springer, 2004.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Prof. Dr. Gregor Witte bedanken, der diese Arbeit betreute und mir somit die Möglichkeit gegeben hat, erste Erfahrungen und Eindrücke im Laboralltag zu sammeln. Sein großes Interesse am Fortschritt der Arbeit und die hervorragende Betreuung wirkten auf mich stets motivierend und fördernd. Ein herzlicher Dank geht auch an die komplette AG MOLFK. Die angenehme und freundliche Atmosphäre haben dazu beigetragen, dass ich mich gut aufgehoben gefühlt habe.

Besonders möchte ich mich hier bei Tobias Breuer bedanken, der mir bei Fragen oder Problemen immer mit Rat und Tat (nicht nur beim Manipulator tragen!) zur Seite stand. Ob es die Erklärungen im Labor, die Einführung am AFM oder der Umgang mit SPIP waren, ich konnte immer von seinen Erfahrungen profitieren.

Zu guter Letzt geht natürlich auch ein Dankeschön an die „Mitbewohner des Bachelorparadieses“. Die gute Stimmung hat auch bei längeren Arbeitstagen immer für die nötige Ausdauer und „Zerstreuung“ gesorgt.

Erklärung der Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

Morphologische Untersuchungen ultradünner Pentacen-Filme

selbstständig verfasst, sowie alle wesentlichen Quellen und Hilfsmittel angegeben zu haben.

Marburg, den 31.05.2010

.....

Antonia Morherr

Einverständniserklärung für Bibliotheken

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die vorliegende Arbeit:

Morphologische Untersuchungen ultradünner Pentacen-Filme

in Bibliotheken allgemein zugänglich gemacht wird.

Dazu gehört, dass sie

- von der Bibliothek der Einrichtung, in der ich meine Arbeit angefertigt habe, zur Benutzung in ihren Räumen bereit gehalten wird,
- in konventionellen und maschinenlesbaren Katalogen, Verzeichnissen und Datenbanken verzeichnet wird,
- der UB für die lokale Benutzung und für Fernleihzwecke zur Verfügung steht,
- im Rahmen der urheberrechtlichen Bestimmungen für Kopierzwecke genutzt werden kann.

Marburg, den 21.06.2010

.....

Unterschrift der Autorin /
des Autors

.....

Unterschrift der betreu-
enden Hochschullehrerin / des
betreuenden Hochschulleh-
rers

