

EXPERIMENTE MIT DEM REMOTE ATOMIC FORCE MICROSCOPE (RAFM)

INAUGURALDISSERTATION

ZUR ERLANGUNG DER WÜRDE EINES DOKTORS DER PHILOSOPHIE
VORGELEGT DER
PHILOSOPHISCH - NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT
DER UNIVERSITÄAT BASEL

VON
PETER RENATO FORNARO
AUS KÄNERKINDEN(BL)



BASEL, 2004

Vorgelegt der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
auf Antrag der Herren Professoren:

Prof. Dr. H.-J. Güntherodt
Prof. Dr. E. Meyer

Basel, den 4. Mai 2004

Prof. Dr. M. Tanner, Dekan

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	v
Vorwort	vii
1 Einleitung	1
1.1 Nanotechnologie in der Ausbildung	2
1.2 E-Learning als neue pädagogische Herausforderung	2
1.2.1 Der Virtuelle Campus Schweiz	2
1.2.2 Nano-World	3
1.2.3 IN-VSEE	3
1.3 Nanowissenschaften in der Industrie	4
1.4 Die Rasterkraft-Mikroskopie im industriellen Umfeld	4
1.5 Aufgabenstellung: Remote Atomic Force Microscope (RAFM)	4
2 Technische Konzepte des RAFM	7
2.1 Hardware-Konzept der Robotik	7
2.1.1 Die Mechanik	7
2.1.2 Die Elektronik	10
2.2 Software-Konzept	11
2.2.1 Einleitung	11
2.2.2 Die Programmierumgebung LabView™	12
2.2.3 Geräteserver	12
Hardware-Schicht	13
Middleware-Schicht	15
Verbindungs-Schicht	15
2.2.4 Client-Applikation	16
2.2.5 Kommando Broadcaster	16
2.2.6 Videoservert	16
Bildquelle	16
Broadcaster	16
Streamings-Server	16
3 Pädagogische Konzepte des RAFM	19
3.1 Ausbildung in drei Stufen	19
3.2 Kollaboratives Lernen am realen Gerät	20
3.3 Controller/Observer Prinzip	22
3.4 Anfänger/Experten Mode	23

4	Die Abbildungsqualität des Mikroskops	25
4.1	Artefakte durch Systemkomponenten	27
4.2	Einfluss der nicht idealen Regeleinrichtung	28
4.2.1	Die Wirkung der Abtastgeschwindigkeit	28
4.2.2	Die Wirkung der Regler-Charakteristik	32
4.3	Einfluss der nicht idealen Messspitze	33
4.3.1	Die Transferfunktion der Messspitze	34
4.3.2	Der Form-Faktor der Messspitze	35
4.3.3	Die Messspitze als Tiefpassfilter	38
4.4	Schlussfolgerung der theoretischen Betrachtungen	39
5	Usability Study: Automatische Verschleisskontrolle der Messspitze	41
5.1	Probleme und Phänomene häufig wiederholter Messungen	41
5.2	Ermittlung der Spitzenqualität bei Verwendung einer Referenzstruktur	42
5.3	Ermittlung der Spitzenqualität ohne Referenzstruktur	45
5.3.1	Einfluss von Fremdlicht	50
5.4	Schlussfolgerung der Studie "Automation"	52
6	Usability Study: Erzeugung sehr grosser Bilder	53
6.1	Das Mosaikprinzip	53
6.2	Bildkantenanpassung	55
6.3	Vision: Intelligentes Positionieren und Messen	55
7	Usability Study: Das RAFM als E-Learning Werkzeug	57
7.1	Motivation	57
7.2	Der Lektionsablauf	57
7.3	Die Experimente	57
7.4	Die Test-Umgebung	58
7.5	Resultate der Studie	58
7.5.1	Gesamteinschätzung	59
7.5.2	Lernerfolg	59
7.5.3	Interesse, mit dem RAFM zu arbeiten	60
7.5.4	Nutzen der kollaborativen Steuerung	61
7.5.5	Qualität der eingesetzten Technik	62
7.6	Schlussfolgerung der Studie "E-Learning"	62
8	Fazit und Ausblick	63
A	Curriculum Vitae	65
B	Poster, Vorträge und Publikationen	67
C	Bedienungsanleitung des Remote Atomic Force Microscope	69
C.1	Die Komponenten des Remote Atomic Force Microscope	69
C.1.1	Das AFM	69
C.1.2	Die Robotik mit dem Probenstisch	69
C.1.3	Die Elektronik	69
C.1.4	Die Staubschutzhaube	71
C.1.5	Dämpfungsmassnahmen	71

C.1.6	Der Steuercomputer	71
C.1.7	Der Kommando-Broadcaster	73
C.2	Aufbau des Geräts	73
C.3	Inbetriebnahme	74
C.4	Die erste Messung	74
C.4.1	Speichern der Positionen der Proben	74
C.4.2	Die Benutzeroberfläche	75
C.4.3	Proben Wahl und Messbeginn	78
C.5	Einzelplatz Betrieb	78
C.6	Mehrbenutzer-Betrieb	79
C.7	Problembehandlung	79
C.7.1	Der Geräteserver reagiert nicht mehr	79
C.7.2	Die Robotik ist dejustiert	79
C.7.3	Die Messungen sind nicht gut	79
C.7.4	Ich kann nicht mit dem Geräteserver verbinden	79
D	Kommando-Liste	81
E	Mathematische Herleitungen	83
	Literaturverzeichnis	87

Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Dissertation "Experimente mit dem Remote Atomic Force Microscope" nur mit der darin angegebenen Hilfe verfasst und bei keiner anderen Fakultät eingereicht habe.

Basel, den 3. April 2004

Peter Renato Fornaro

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird ein fernsteuer- und programmierbares Raster-Kraft Mikroskop (RAFM) vorgestellt. Das Gerät ist mit einer hochpräzisen Robotik ausgerüstet, die es erlaubt, Proben automatisch und ferngesteuert mit einer Toleranz von weniger als $1.5 \mu\text{m}$ zu positionieren. Eine einfache Programmiersprache erlaubt es, das Instrument zu programmieren, um komplexe Messabläufe automatisch ablaufen zu lassen. Neben der Beschreibung der entwickelten Hard- und Software, werden in der Arbeit Resultate aus programmierten Langzeitexperimenten auf AlO_2 Sinterkeramik vorgestellt. In unterschiedlichen Reibungsexperimenten wurden Veränderungen der Spitzengeometrie von bis zu sechs Winkelgrad gemessen. Dieser Verschleiss der Messspitze wird unter dem Aspekt der maximal möglichen Abbildungsleistung diskutiert. In einer analytischen Betrachtung der Kontaktgeometrie von Spitze und Oberflächen, wird ein Frequenzverhalten belegt, dass einem Tiefpass ähnlich ist.

Der Einsatz der Robotik als Längenaktuator im Mikrometerbereich erlaubt das automatische Akquirieren von sehr grossen Oberflächenbereichen von bis zu 14 mm^2 mit Auflösungen bis 25 nm .

Das Instrument verfügt über eine kollaborativ ausgelegte Steuer- und Messsoftware, die eine dezentrale Bedienung des Geräts über das Internet erlaubt. In Kombination mit einem aus der Luftfahrt stammenden Ausbildungskonzept stellt das RAFM eine optimale Plattform für die Ausbildung im Bereich der Nanotechnologie dar. In einer Usability Study mit unterschiedlichen Benutzern aus dem universitären und gymnasialen Umfeld wird die hohe Qualität des Geräts als Lehrmittel bestätigt.

Vorwort

Die Vollendung dieser Arbeit war nur Dank der Mithilfe vieler Personen möglich!

Ich danke im besonderen Dr. Tibor Gyalog und Dr. Martin Guggisberg die durch grossen persönlichen Einsatz zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Vor allem Dr. Gyalog hat mit seinem überaus grossen Wissen und seinen hervorragenden didaktischen Qualitäten entscheidend zur Realisierung dieser Arbeit beigetragen. Ich danke Prof. Dr. Ernst Meyer, Prof. Dr. H. - J. Güntherodt und Prof. Dr. F.-K. Thielemann für die Unterstützung vor und während der Dissertation. Im Rahmen der langjährigen Arbeit am Institut für Physik weckten Sie meine Begeisterung für die Nanowissenschaften und motivierten mich zu dieser Arbeit.

Ich danke Benedikt Willi, Christian Wattering, Christian Freiburghaus, Lars Zimmerli, Dino Keller, Raoul Schneider, Pascal Betz, Prof. Dr. H. Burkhart, Dr. Olaf Schenk, Karin Liesenfeld und Michael Hagemann für die gute Zusammenarbeit und die spannenden Diskussionen in den Räumlichkeiten des Kragenbaus des Pharmazentrums. Ich danke Dominik Brändlin, Loris Scandella, Lukas Howald und Robert Sum für die Bereitstellung und den Support des easyScanTMAFM.

Ich danke Prof. Dr. Rudolf Gschwind, Dr. Lukas Rosenthaler für die vergangene Zusammenarbeit und die neuen Projekte, die auf uns zu kommen.

Ich danke H.-R. Hidber, Andreas Tonin und Robert Maffiolini für die Hilfe im Bereich der Elektronik und Sylvester Jakob und Heinz Breitenstein für die optimale Unterstützung im Bau und der Konstruktion des RAFM. Ich danke Astrid Kalt, Barbara Kammermann, Jacqueline Vetter und Germaine Weaver für die administrativen Arbeiten.

Ich danke meiner Familie, im besonderen meiner Mutter für die hervorragende Betreuung während vieler Jahre. Ich danke meiner Tante Inge Friedli für das Lektorat.

Ich danke meiner Partnerin Isabel für die gute Zeit die wir verbringen dürfen, für Ihre Toleranz in den langen Nächten der Arbeit und Ihren Einsatz bei den täglichen Arbeiten für die Familie. Meinem Sohn Claudio Pablo Lisboa danke ich für seinen endlosen Charme und seine herzlichen Begrüssungen nach den Tagen an der Uni.

Diese Arbeit wurde finanziert durch die Gebert-Rüf Stiftung.

1 Einleitung

Die Nanowissenschaften umfassen ein junges Gebiet der Forschung, dessen Innovationspotential sich in den vergangenen Jahren in den verschiedensten Bereichen der Industrie und Wirtschaft entfaltet hat. Ziel dieses Forschungsgebietes ist es, Objekte in der Grössenordnung zwischen einem und einigen hundert Nanometern zu analysieren, zu manipulieren und herzustellen. Der Zugang zum Bereich des Nanometers erfolgte schrittweise, durch immer weitere Miniaturisierung von bestehenden Strukturen. Zunehmend wird jedoch versucht, in Anlehnung an die Natur, Prinzipien der Selbstorganisation [1, 2] zum Zusammenfügen kleiner Bausteine zu grösseren, aber immer noch im Nanobereich angesiedelten Systemen, zu nutzen.

Historisch gilt ein Vortrag des späteren Physik-Nobelpreisträgers Richard Feynman [3] (1918-1988) als Geburtsmoment der Nanowissenschaft. Er formulierte am 29. Dezember 1959 auf dem jährlichen Treffen der Amerikanischen Physikalischen Gesellschaft seine Idee von einem Paradigmenwechsel in der Miniaturisierung und seine Visionen von der Manipulation von Materie auf atomarer Ebene. In dem Vortrag "There's Plenty of Room at the Bottom", skizziert er das Programm, statt wie bisher Dinge zu verkleinern, sie in ferner Zukunft aus den kleinsten Teilchen zu konstruieren (Feynman 1959).

Eine wesentliche Festigung erfuhr die Nanowissenschaft durch die Erfindung des STM durch G. Binnig und H. Rohrer [4, 5], für die sie 1986 den Physik-Nobelpreis erhielten. Ebenfalls von entscheidender Bedeutung war die Erfindung des Atomic-Force Microscop (AFM) durch G. Binnig, C. F. Quate und Ch. Gerber [6]. Mit diesen beiden Mikroskop-Typen war es möglich geworden, die konzeptionellen Ideen durch angewandte Forschung weiter zu untersuchen. Die Technik der unter dem Namen Scanning Probe Microscopy [7, 8] zusammengefassten verschiedene Messprinzipien hat eine breite Anwendung im Gebiet der Oberflächen-Physik gefunden. Unterschiedliche Probleme wie Oberflächenstrukturen [9, 10], Adsorption von Molekülen [11] oder lokale elektrische Eigenschaften [12] konnten gezielt untersucht werden. In der Industrie findet die Mikroskopie auf kleinsten Längenskalen immer weitere Verbreitung. Eigenschaften wie Rauigkeit oder die Härte von Materialien und die optischen Eigenschaften von Beschichtungen [13] konnten untersucht werden. Auch die Phänomene von Reibung auf atomarer Ebene werden untersucht [14, 15, 16, 17].

Bei der Nanotechnologie handelt es sich um eine Schlüssel- und Querschnittstechnologie, die aus der Nanowissenschaft entstanden ist. An deren Entwicklung sind zentrale naturwissenschaftliche und technische Disziplinen beteiligt. Die Herstellung und Analyse von Objekten mit Abmessungen im Bereich des Nanometers ist auf die Nutzung physikalischer, chemischer und biologischer Prinzipien angewiesen und beruht auf Fortschritten in den unterschiedlichen Disziplinen und ihrem transdisziplinären Transfer. Während sich die Nanotechnologie einerseits bereits in einem Stadium der Anwendungsreife befindet (poröse Materialien [18], funktionale Beschichtungen), ist sie in anderen Bereichen (Nano-Maschinen [19, 20]) noch im Stadium von Vision und Grundlagenforschung angesiedelt.

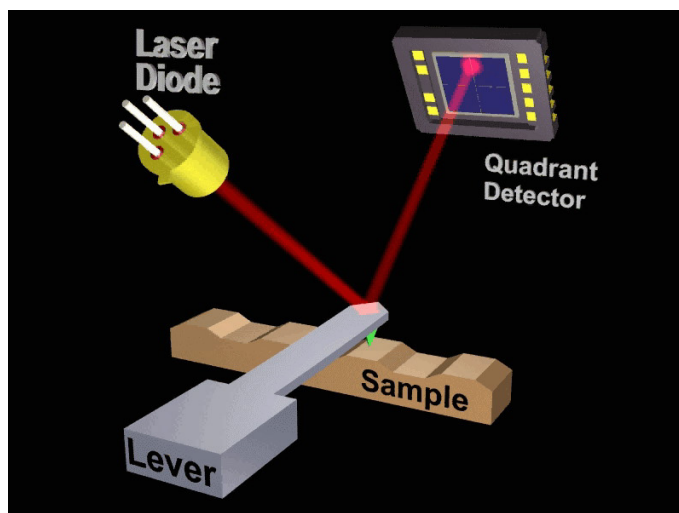


Abbildung 1.1: Der Federbalken des Raster-Kraft Mikroskopes (engl. Cantilever) ist nebst dem Raster-Tunnel Mikroskop die wichtigste Erfindung in der Nanotechnologie. Dieser Federbalken kann verwendet werden, um Kräfte im Femto-Newton Bereich zu Messen.

1.1 Nanotechnologie in der Ausbildung

Die Nanotechnologie ist ein ausserordentlich aktuelles Gebiet der Forschung. Der angewandte Teil dieses Gebiets wird dennoch nur bedingt in der Lehre angeboten. Hauptverantwortlich für diesen Umstand ist die Tatsache, dass die im universitären Umfeld verwendeten Rastertunnel- und Rasterkraft-Mikroskope sehr komplex zu bedienen sind und sich nicht für den Ausbildungseinsatz eignen. Ziel ist es aber, durch geeignete Massnahmen einem breiten Publikum die Möglichkeit zu geben, sich ein objektives Bild der Nano-Technologie zu verschaffen. Um diesen Ansatz in die Wirklichkeit umzusetzen wird ein Gerät benötigt, das eine einfache Benutzerschnittstelle zur Verfügung stellt, auf die mit geringem Aufwand zugegriffen werden kann. Das Internet ist zu diesem Zweck ausserordentlich gut geeignet. Wird ein solches Gerät in eine geeignete Lernumgebung eingebettet, wird die Möglichkeit geboten, das Gebiet der Nanotechnologie z. B. im Rahmen eines Praktikums Studierenden näher zu bringen.

1.2 E-Learning als neue pädagogische Herausforderung

E-Learning als Werkzeug, das ergänzend zu klassischem Unterricht eingesetzt werden kann, ist ein neues Gebiet der Ausbildung [21, 22, 23, 24]. Ziel von E-Learning ist es, Computer und die im Zusammenhang stehende, vernetzte Infrastruktur für die Ausbildung zu nutzen [25]. Die in der Nanotechnologie eingesetzten Instrumente sind prinzipbedingt für den Einsatz mit Computern ausgelegt und eignen sich hervorragend, um in einem E-Learning Umfeld eingesetzt zu werden. In unterschiedlichen Projekten wird versucht, den Ansatz der Ausbildung mittels Computern und virtuellen Werkzeugen umzusetzen und deren Nutzen zu untersuchen.

1.2.1 Der Virtuelle Campus Schweiz

Das Swiss-Virtual-Campus-Programm [26] ist ein Teil eines gesamtschweizerischen Prozesses. Dieser hat zum Ziel, die Informationsgesellschaft in der Schweiz zu fördern. Dazu soll das Bildungswesen - im speziellen auf der Stufe der Hochschulen - von den neuen Möglichkeiten der Informations- und

Kommunikationstechnologien profitieren. Studierende sollen virtuell Kurse von anerkannter Qualität am Bildschirm verfolgen können. Dieses Konzept ermöglicht ihnen eine aktive Rolle im Lernprozess. Das grundsätzliche Ziel des Programmes ist es, Unterrichtseinheiten zu entwickeln, die via Internet in mehreren regulären Studienprogrammen der Schweizer Universitäten genutzt werden. (Zitat VCS Homepage)

1.2.2 Nano-World

Nano-World [27] ist ein Teil des Bundesprogramms Virtueller Campus Schweiz. Nano-World hat sich zum Ziel gesetzt, mit einem interdisziplinären Team ein virtuelles Labor [28, 29] zu entwickeln, das Studierenden der Naturwissenschaften die Nanotechnologie näher bringen soll. Die virtuellen Versuche [30] simulieren Experimente aus der aktuellen Forschung auf dem Gebiet der Nanowissenschaften. Für die Bearbeitung der problembasierten Experimentier-Module erhalten die Studierenden Credit Points gemäss dem Europäischen Credit Point System.

1.2.3 IN-VSEE

IN-VSEE [31] ist ein Konsortium von IngenieurInnen, WissenschaftlerInnen aus dem universitären und industriellen Umfeld, Oberstufenlehrern und Ausbildern von Museen, die sich zum Ziel gesetzt haben, die Vision eines interaktiven World Wide Webs umzusetzen. Die Entwicklung soll neue Ausbildungskonzepte mittels fernsteuerbaren Geräten der Nanotechnologie anwenden, um Oberflächen zu analysieren und charakterisieren. Studierende sollen so auf die Arbeit im aktuellen Feld der Nanotechnologie vorbereitet werden. IN-VSEE ist ein U.S amerikanisches Projekt zur Konstruktion eines virtuellen Labors.

1.3 Nanowissenschaften in der Industrie

“Kleiner, schneller, leistungsfähiger“ sind für viele Industriebereiche zunehmend wichtiger werdende Produkteigenschaften. Im Bereich des Nanometers verbinden sich physikalische, chemische und biologische Funktionen, aus denen sich Lösungen für Anwendungen ergeben, die die heutige Mikrotechnologie nicht erreicht. Die Miniaturisierung hin zu Strukturen auf der Mikrometer- und Nanometer-Skala führt nicht nur zu einer erheblichen Platzersparnis, sondern eröffnet den Zugang zu physikalischen Effekten, die in der makroskopischen Welt nicht zur Verfügung stehen und bildet mit diesem Potential eine der Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts [32].

Erkenntnisse aus der Nanotechnologie bringen eine vielfältige Produktpalette hinsichtlich dieser geforderten Kriterien in etablierten Anwendungsfeldern hervor. Der Einfluss nanotechnologischer Erkenntnisse auf verkaufbare Produkte besteht schon seit Jahren in den Bereichen Elektronikherstellung [33], Datenspeicherung [34], funktionelle Schichten oder Präzisionsoptiken. In den letzten Jahren sind nanotechnologische Erkenntnisse zunehmend auch in die Felder Biologie, Chemie, Pharmazie und Medizin eingeflossen, und dieser Trend wird voraussichtlich weiter anhalten. Speziell in den Bereichen Pharmaka-Screening, Biochips und bei der analytischen Unterstützung industrieller Entwicklungen besteht bereits ein deutlich wachsendes Industrieinteresse. Die Nanotechnologie ist nicht nur als Ergänzung zur Mikrotechnologie für die High-tech Branchen wichtig. Nanotechnologische Anwendungen fließen sogar teilweise auch in Low-Tech-Produkte ein: Farben und Kosmetik sind Beispiele dafür.

Die Schweiz ist auf dem Gebiet der Nanowissenschaften gegenüber der internationalen Konkurrenz gut positioniert [35, 36].

1.4 Die Rasterkraft-Mikroskopie im industriellen Umfeld

Die Nanotechnologie hilft in weiten Bereichen, um neue Produkte auf den Markt zu bringen, die direkt Nutzen aus der weiteren Miniaturisierung ziehen. Nanotechnologische Hilfsmittel werden oftmals verwendet, um neue Produktideen zu finden und um die Entwicklung von neuen Produkten zu ermöglichen. Der Einsatzbereich der wichtigsten in der Nanotechnik verwendeten Werkzeuge ist auf das Forschungslabor beschränkt. Nach wie vor problematisch ist der Einsatz dieser Werkzeuge der Nanotechnologie in der Industrie, wenn es um den Produktionsprozess selbst geht. Das Einbinden eines Raster-Sonden Mikroskops in den Produktionsprozess in nahezu allen Fällen unmöglich. Die Steuerungen sind zu komplex und die Geräte nicht programmier- und automatisierbar.

Bis heute ist die Nanotechnologie noch so nahe mit dem Messprozess als solchem verbunden, dass die Geräte für Benutzer aus anderen Fachgebieten kaum anwendbar sind. Anwendungen in nano-externen Feldern kommen daher nicht in dem Masse zu stande, wie der Nutzen der Technologie für diese Disziplinen wäre; namentlich als Werkzeug in der Qualitätskontrolle. Das Werkzeug steht im Zentrum anstelle des zu untersuchenden Objekts.

Der Einsatz eines AFM in einem expertenfremden Umfeld bedarf eine Abstraktion des Werkzeugs um das zu untersuchende Objekt in den Mittelpunkt zu stellen. Ähnlich wie die graphische Benutzeroberfläche eines Computers eine Zwischenschicht zwischen Mensch und Maschine darstellt.

1.5 Aufgabenstellung: Remote Atomic Force Microscope (RAFM)

Die vorliegende Dissertation beschreibt die Entwicklung und die Inbetriebnahme eines vollkommen automatisier- und fernsteuerbaren Rasterkraft-Mikroskopes (RAFM) basierend auf einem easyScanTMAFM der Firma Nanosurf [37]. Das Instrument wurde als Werkzeug zur Durchführung realer Experimente im

Projekt "Nano-Word" des "Schweizerischen Virtuellen Camus" im Rahmen der Ausbildung der Nanowissenschaften entwickelt. Zur Aufgabenstellung gehörten die Planung und der Bau des Instruments, die Konzeption und Implementation der kollaborativen, dem Benutzer anpassbaren Steuersoftware, sowie die Auswertung von Experimenten mit physikalischem und didaktischem Hintergrund. Um die erarbeiteten didaktischen Konzepte auf ihren Nutzen hin zu untersuchen, wurde im Rahmen der Arbeit eine "Usability-Study" mit unterschiedliche Benutzergruppen durchgeführt.

Ebenfalls Teil der Arbeit war die Untersuchung der Eignung eines automatisch arbeitenden Raster-Kraft Mikroskops im Umfeld der industriellen Qualitätskontrolle. Im Prozess der Qualitätskontrolle sollen z. B. grosse Stückzahlen einer bestimmten Probe auf ihre Oberflächenqualität hin untersucht werden. Bedingt durch das Messprinzip - der abtastende Sensor steht im mechanischen Kontakt mit der Oberfläche - unterliegt die Messspitze einem Verschleiss der die Abbildungsqualität beeinflusst. Im Rahmen der Arbeit wurde erarbeitet, wie stark sich dieser Verschleiss auf die Aussagekraft einer Messung auswirkt.

In der Arbeit werden die technischen Konzepte und Eigenschaften der Hard- und Software vorgestellt, die Resultate und Phänomene von Messungen über lange Zeit und grosse Flächen diskutiert und die Ergebnisse der Usability-Study im angewandten Unterrichtseinsatz vorgestellt.

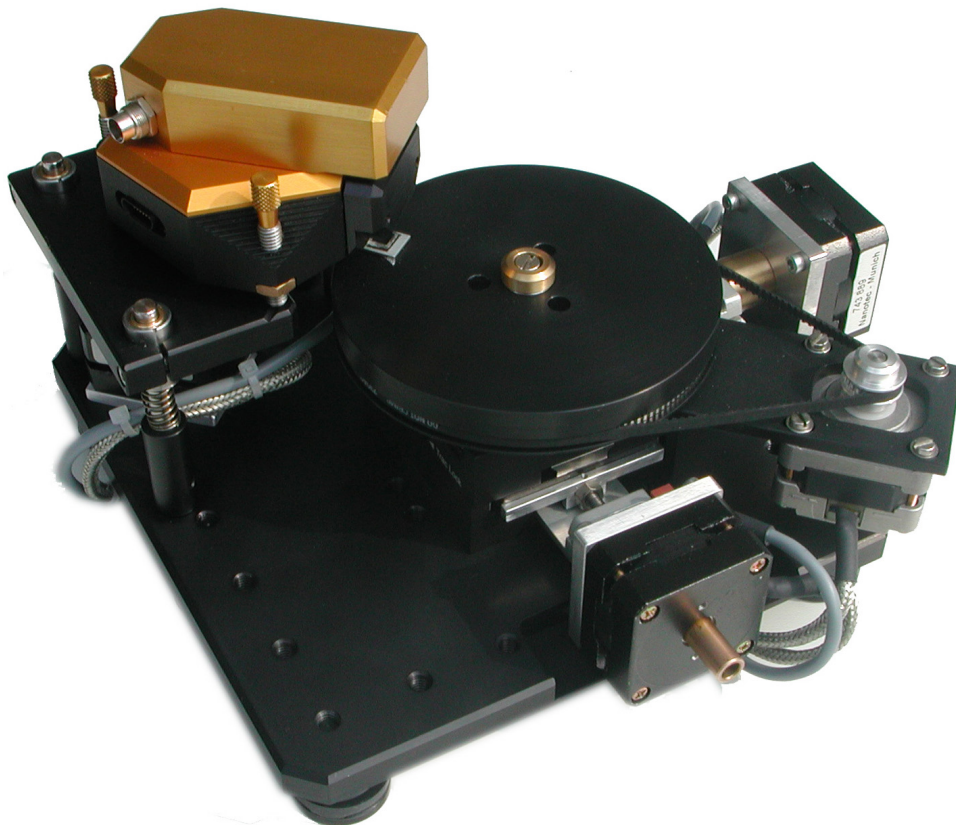


Abbildung 1.2: Das Remote Atomic Force Microscope

2 Technische Konzepte des RAFM

2.1 Hardware-Konzept der Robotik

2.1.1 Die Mechanik

Das Remote Atomic Force Microscope ermöglicht die Verschiebung des Messbereiches auf zwei unterschiedlichen Längenskalen. Für die Feinpositionierung wird eine Antriebsmechanik im Messkopf des Nanosurf easyScan™ AFM eingesetzt. Für die Grobpositionierung wurde ein automatischer Robotik-Probentisch entwickelt und konstruiert. Die Konstruktion des Robotik-Probentisches des RAFM basiert auf einer Aluminium Trägerplatte. Diese Platte ist das verbindende Element für einen kommerziell erhältlichen, mit Motoren ergänzten XY - Kreuztisch von NewFocus [38], einen ebenfalls motorbetriebenen Z-Achsen Lift, eine Steckerleiste, sowie mehrere Polymer Dämpferelemente. Alle Komponenten sind auf minimales Spiel ausgelegt und weisen mechanische Toleranzen von weit unter einem $1\ \mu\text{m}$ auf. Die integrierten Linearkugellager des XY - Kreuztisches weisen Führungen aus gehärteten und polierten Schienen auf, die für weichen und hochpräzisen Lauf sorgen. Die Genauigkeit des Tisches selbst liegt un-

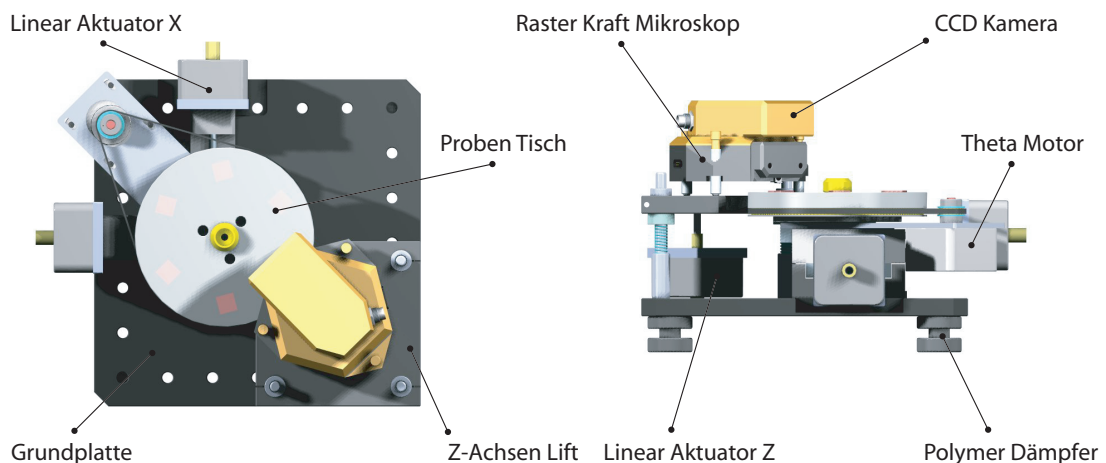


Abbildung 2.1: Das komplette Setup des Remote AFM: Auf dem Bild erkennt man die wesentlichen mechanischen Komponenten des Systems.

ter $0.5\ \mu\text{m}$ und dies bei einem maximalen Fahrweg von 14 mm der Achsen. Auf dem Kreuztisch befindet sich ein Drehtisch, der als Plattform für Proben verschiedener Experimente dient. Dieser Probentisch ist mit einem Zahnriemen-Direktantrieb und einem handelsüblichen Schrittmotor ausgestattet. Der Motor hat eine Winkelauflösung von $0,18^\circ$ und ein Drehmoment von 4 Ncm im Vollschrittbetrieb,¹ die durch das Übersetzungsverhältnis des Riemens auf $0,031^\circ$ weiter reduziert wird.

¹Ein Schrittmotor besitzt eine mechanische Auflösung, die durch die Anzahl Pole gegeben ist. Wird ein Spulenpaar von einem Strom durchflossen, richtet sich der Anker bedingt durch das magnetische Feld aus. Abhängig von der Steuerelektronik können anstelle von nur einem Spulenpaar mehrere angesteuert werden, so dass der Anker zwischen zwei Polen zu liegen kommt. Durch diese Halb- oder Viertelschritte kann die Auflösung des Antriebs erhöht werden.

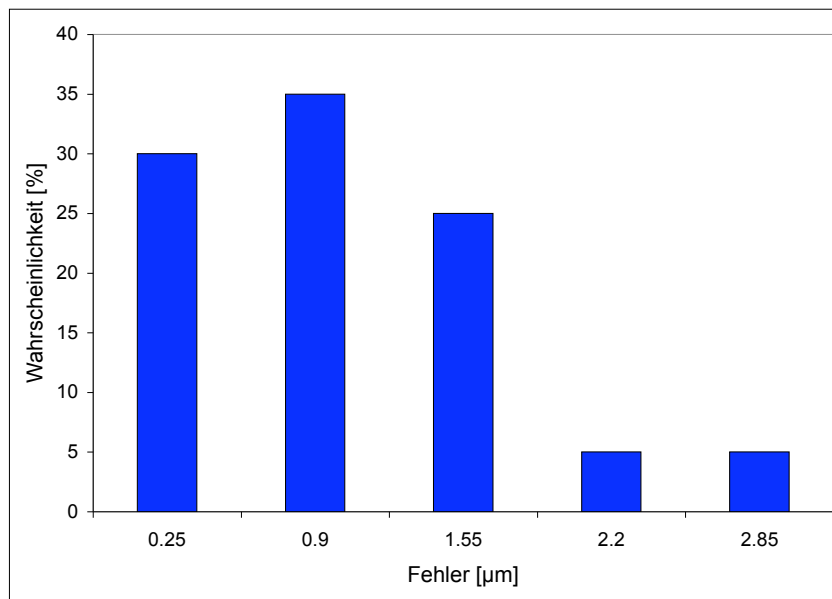


Abbildung 2.2: Das RAFM besitzt eine sehr präzise Mechanik. Wird das Gerät repositioniert, können Feature auf Proben mit einer Genauigkeit von deutlich unter $2\mu\text{m}$ wiedergefunden werden.

Um das Mikroskop an Proben mit stark unterschiedlicher Höhe anzupassen, ist ein z-Achsen Lift entwickelt worden. Der Lift besteht aus drei polierten Stützen aus rostfreiem Stahl auf denen eine mit drei Laufbuchsen versehene Plattform angehoben werden kann. Die Konstruktion des Lifts besitzt ebenfalls eine mechanische Genauigkeit von unter $0.5\mu\text{m}$. Das Nanosurf easyScanTM AFM wird auf diese Z-Plattform gestellt, von wo es zur Wartung oder zum Spitzenwechsel problemlos entfernt werden kann. Die xy- und z-Achsen sind mit kommerziell erhältlichen Linear-Aktuatoren² der Firma Nanotec[39] ausgerüstet. Diese Motoren erreichen eine maximale Scherkraft von 40 N bei einer Auflösung von $3.5\mu\text{m}$ pro Vollschritt und eine maximale Verstellgeschwindigkeit von 20 mm/s. Ein wesentliches Problem in mechanischen Positioniereinrichtungen ist Hysterese. Nebst den Toleranzen der unterschiedlichen Komponenten, ist diese Hysterese hauptverantwortlich für Positionierungenauigkeiten. Hysterese entsteht durch die mechanische Toleranz in den Gewinden der Linear-Aktuatoren und durch Spiel in den Lagersitzen. Wird zum Beispiel eine Positionsänderung in positiver x-Richtung und anschliessend eine Korrektur in negativer x-Richtung vorgenommen, so überträgt sich die Stellkraft jeweils über die andere Seite der Gewindeflanken. In unserem Aufbau wird dieses Problem durch Vorspannungstechniken minimiert. Die linearen Verschiebeeinrichtungen der Achsen sind mittels Federkraft in wohl definierte Lagen gebracht. Jedes Lager wird durch Spannschrauben spielfrei vorgespannt. Das gesamte mechanische Setup inklusive dem AFM [vgl. Abb.2.3] hat eine Grösse von 200 x 200 x 150 mm. Die geringen Ausmasse und der leicht verständliche Aufbau machen das Gerät sehr kompakt und einfach zu handhaben.

²Ein Linear-Aktuator ist ein Schrittmotor, der eine Drehbewegung durch eine Gewindelaufbüchse und eine entsprechende Gewindestange in eine lineare Bewegung umsetzt.

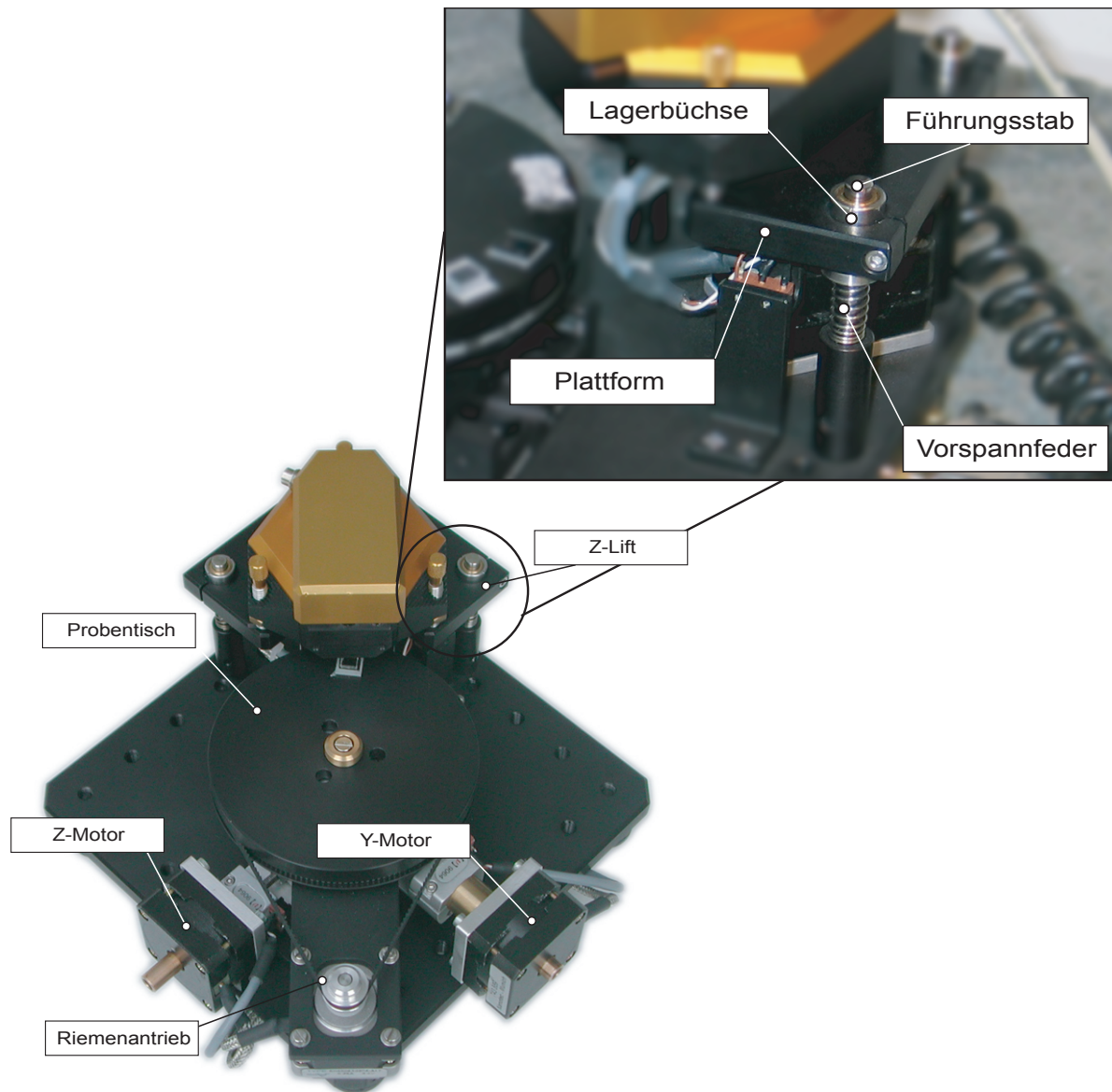


Abbildung 2.3: Die Antriebs Elemente der Robotik. Die x-, y-, und z-Achse werden mit linear Aktuatoren angetrieben, der Drehteller mit einem Riemenantrieb. Durch die mit Federkraft vorgespannten Achsen werden mechanische Toleranzen minimiert.

2.1.2 Die Elektronik

Die Robotik des RAFM, mit ihren unterschiedlichen Motoren, wird durch eine im Haus entwickelte Power Control Unit (PCU) angetrieben. Es handelt sich bei der Elektronik um eine Verstärkerstufe, die TTL-Signale in Phasenströme hoher Leistung umwandelt. Die Motoren benötigen für die Funktion folgende einfache Signale:

- Select Input, um einen der Motoren der x-, y-, z- oder theta-Achse anzuwählen (0V=Enable, 5V=Disable).
- Direction Input, um die Drehrichtung des mit Select Input gewählten Motors zu definieren (0V=CCV, 5V=CV).
- Step Input, um den gewählten Motor in der gewählten Richtung um einen Schritt zu bewegen (positive TTL Flanke wird detektiert.)

Die notwendigen Steuer-Signale werden auf einer Digital-Input-Output (DIO) Karte generiert und in der PCU ausgewertet. Von der PCU zum Geräte Server wird ein 50-poliges Flachbandkabel verwendet, von der PCU zum Mikroskop zwei abgeschirmte Kabel. Eines für die hochstromigen Leistungssignale und eines für Steuersignale, die vom Gerät ausgelesen werden. Bei den auszulesenden Signalen handelt es sich um Mikroschalter, die notwendig sind, um die Endposition der einzelnen Achsen zu detektieren, um im Fehlerfall einen mechanischen Defekt abzufangen. Um reproduzierbare und genaue Positionierungen durchführen zu können, wird jede Achse zu Beginn kalibriert. Das heisst, jeder Motor wird mit geringer Geschwindigkeit bis zum Schliessen eines bei der Endposition montierten Kontaktes angesteuert und dieser Ort als Null-Position gespeichert. Von diesem Ort werden softwaremässig die Steuerimpulse mitgezählt und daraus die neue Position berechnet.

2.2 Software-Konzept

2.2.1 Einleitung

Die Komplexität der Software eines fernsteuerbaren Mikroskops ist um einiges grösser, als bei einem klassischen "stand alone" Gerät. Unterschiedlich, zusätzliche Kommunikationskomponenten sind erforderlich, die miteinander Daten austauschen. Aus diesem Grund wurde bei der Softwareentwicklung die Schnittstellen und die verwendeten Protokolle klar definiert. Abbildung 2.4 zeigt die unterschiedlichen Komponenten, welche das System des RAFM bilden. In den folgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Komponenten des RAFM-Systems eingegangen.

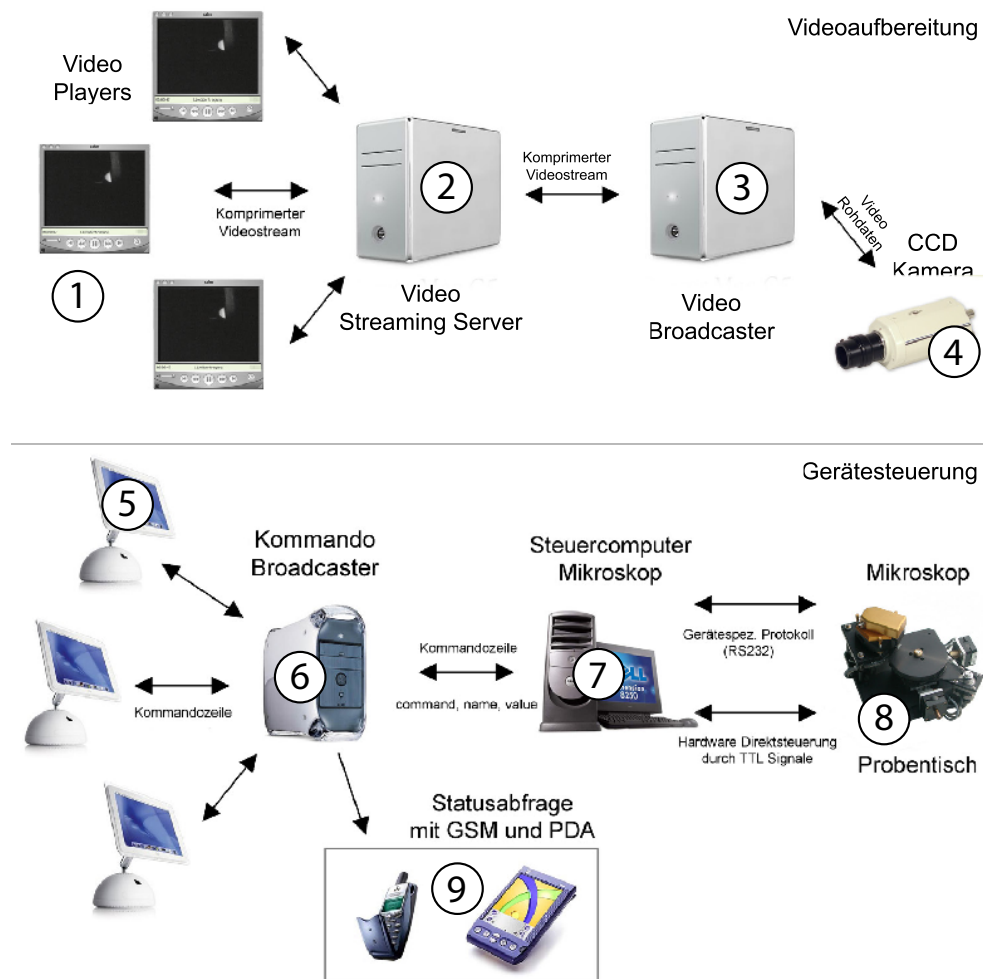


Abbildung 2.4: Das komplette Setup des Remote AFM: Im oberen Bildteil sind die Komponenten der Videobild-Übertragung dargestellt. Der erzeugte Videostream wird von einem Streamingserver (2) an die unterschiedlichen Player (1) gesendet. Der Broadcaster komprimiert die Video Rohdaten (3), die von der CCD-Kamera (4) erzeugt werden. Im untern Bereich des Bildes ist die Instrumentierung zu erkennen. Der Benutzer arbeitet an einer Client-Application (5). Der Kommando-Broadcaster repliziert alle Daten (6), der Geräte-Server (7) ist das Bindeglied zwischen Netzwerk und Geräteansteuerung. Die Instrumentierung kann auch mit mobilen Geräten gesteuert werden (9).

2.2.2 Die Programmierumgebung LabView™

Für die Wahl der Programmiersprache waren einige Bedingungen von Bedeutung:

1. Der geschriebene Code soll gute Wartbarkeit aufweisen.
2. Die Modularität und Wiederverwendbarkeit von entwickelten Komponenten sollte möglichst gross sein.
3. Das System soll erweiterbar bleiben
4. Eine Anbindung an bestehende Netze sollte einfach umzusetzen sein
5. Die Software sollte soweit möglich plattformunabhängig sein
6. Hardware soll einfach ansteuerbar sein

All diese Kriterien führen uns zu einer Entwicklungsumgebung, die im industriellen Umfeld breite Anwendung findet: LabVIEW™ von National Instruments [40].

LabVIEW™ ist eine revolutionäre grafische Entwicklungsumgebung mit integrierten Funktionen für die Signalerfassung, Messwertanalyse und Datenpräsentation, die dem Anwender die Flexibilität einer Programmiersprache an die Hand gibt, ohne die Komplexität herkömmlicher Entwicklungsumgebungen. LabVIEW™ bietet umfangreiche Funktionen zur Datenerfassung, -analyse und -darstellung in einer einzigen Umgebung und ermöglicht dadurch die mühelose Erstellung eines kompletten Systems auf verschiedene Plattformen.

Die Entwicklungsumgebung umfasst leistungsstarke integrierte Funktionen sowie Add-on-Werkzeuge, die speziell für Messwertanalysen und Signalverarbeitung konzipiert sind. Mit diesen Werkzeugen können Messwerte direkt bei der Erfassung analysiert, sehr einfach Informationen extrahiert, Daten optimiert und Anwendungen mit einer Funktion versehen werden, die auf Grundlage der erfassten Daten Entscheidungen trifft. Für die hier gestellte Aufgabe ist diese Entwicklungsumgebung nahezu perfekt geeignet. Das gesamte RAFM-System ist aus diesem Grund in LabVIEW™ implementiert worden.

Für die Entwicklung der Steuersoftware wurden folgende Komponenten von Labview verwendet:

1. Elemente für die TCP/IP-Kommunikation
2. Queue Kommunikation
3. Digitale Signal Verarbeitung
4. Mathematische 2D-Array Verarbeitung
5. String Handling

2.2.3 Geräteserver

Ein zentraler Teil der gesamten Software-Infrastruktur befindet sich auf dem Geräteserver [vgl. Abb. 2.4], der zentral im System eingebettet ist. Dieser garantiert die Kommunikation mit der Robotik und dem Mikroskop, regelt die gesamte Protokoll-Transformation und stellt die Netzwerkanbindung allen angeschlossenen Benutzern zur Verfügung. Die verschiedenen Aufgaben des Geräte-Servers werden in einer wartbaren 3-Schichten Architektur realisiert [vgl. Abb.2.5]. Diese Architektur erlaubt es, das System sehr schnell an neue Gegebenheiten der Infrastruktur anzupassen. Wird z.B das Mikroskop durch einen andern Typ ausgetauscht, muss nur die entsprechende Hardware-Schicht ausgetauscht werden. Ändern sich die Netzwerkgegebenheiten, reicht es, die Verbindungsschicht (Interface for Clients) anzupassen. Diese klare Struktur ist zum einen Garant für einfach zu wartenden Code, zum andern sehr flexibel, wenn es um Weiterentwicklungen oder Anpassungen geht. Im Folgenden wird auf die Details der einzelnen Schichten eingegangen. Da es sich bei den unterschiedlichen Layern um eigenständige Programme handelt, wird zur Kommunikation ein Kommandostapel³ verwendet.

³Ein Kommandostapel (engl. Queue) ist ein Speicher, der Daten in korrekter Reihenfolge speichern kann. Unterschiedliche Programme oder Programmteile können auf diesen Speicherbereich zugreifen und so Information austauschen.

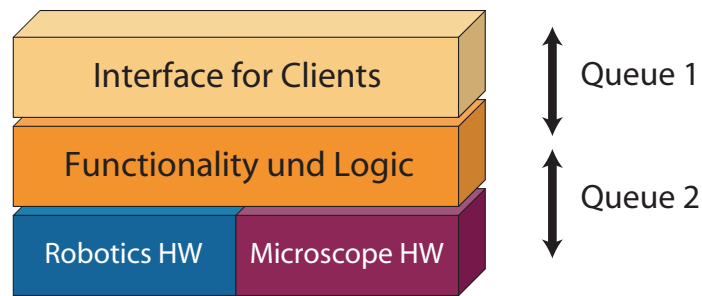


Abbildung 2.5: Die Software des Geräteservers besteht aus drei Schichten, die mit Hilfe von Queues (Datenstapel) miteinander kommunizieren. Jede Schicht läuft als eignes Programm und kann, sofern die Schnittstellenvereinbarung eingehalten wird, durch eine andere ersetzt werden.

Hardware-Schicht

Die Hardware-Schicht lässt sich in zwei Module einteilen: In die Software zur Ansteuerung der Robotik und in die Software für die Kommunikation mit dem Easyscan-AFM. Zur Steuerung der Robotik werden TTL Signale verwendet, die in Kapitel 2.1.2 vorgestellt wurden. Für die Kommunikation mit dem Mikroskop wird der serielle Port verwendet.

Ein wesentlicher Bestandteil der Robotiksteuerung ist ein Positionsregler und ein digitaler Signalgenerator, der die TTL Signale für die Hardware erzeugen kann. Der Positionsregler erlaubt es, eine beliebige Position schnell, präzise und mit einer maximalen Beschleunigung anzufahren. Um den übergeordneten Schichten der Software eine einfache Schnittstelle anbieten zu können, wird die notwendige Information für die Ansteuerung der Robotik, auf die gewünschte Position beschränkt. Der Hardware-Schicht wird ein Set von vier Koordinaten (X, Y, Z, α) übergeben. Der Positionsregler vergleicht diese Werte mit der momentanen Position und erzeugt die notwendigen digitalen Signale. Der Algorithmus in dieser Schicht korrigiert sequenziell jede Achse um den entsprechend Wert, bis die momentane Ist-Position mit der gewünschten Soll-Position übereinstimmt. Damit die Bewegung zur neuen Position möglichst sanft verläuft, sind im Regler die Parameter a_{max} und v_{max} definiert. Diese legen fest, wie schnell der Tisch beschleunigen und verzögert wird und definieren welche maximale Geschwindigkeit gefahren werden darf. Die maximal Stellgeschwindigkeit hängt stark von der Zykluszeit des verwendeten Rechners ab. Praxisnahe Werte von 20 mm/s sind bereits mit einem einfachen Rechner der 800 MHz Klasse möglich und das bei der bereits erwähnten Positioniergenauigkeit von unter $2 \mu\text{m}$.

Der hier programmierte Regler weist einen modifizierten Feedback-Loop auf. Die rückgeführte Grösse f_{out} wird nicht an der Mechanik selbst gemessen, sondern am Steuereingang der PCU, also am Step-Input der Treiberstufe. Diese Modifikation ist nur möglich, weil die Schrittmotoren bei kontinuierlicher Beschleunigung eine sehr hohe Zuverlässigkeit bei der Ausführung der Schritte aufweisen. Bei externer Beeinflussung der Position, zum Beispiel durch manuelles Verstellen einer oder mehrerer Achsen kann der Regler nicht mehr korrigierend eingreifen. Da das Gerät aber ohnehin vor unerlaubten Manipulationen geschützt werden muss, ist diese Einschränkung kein wesentlicher Nachteil. Formal gesprochen sieht das Reglerverhalten wie folgt aus:

$$v_{motor} \propto \frac{x_{soll} - x_{ist}}{\Delta t} \quad (2.1)$$

$$f_{out} \propto \frac{1}{v_{motor}} \quad (2.2)$$

$$x_{ist} = x_{alt} + \Delta x_{ist} \quad (2.3)$$

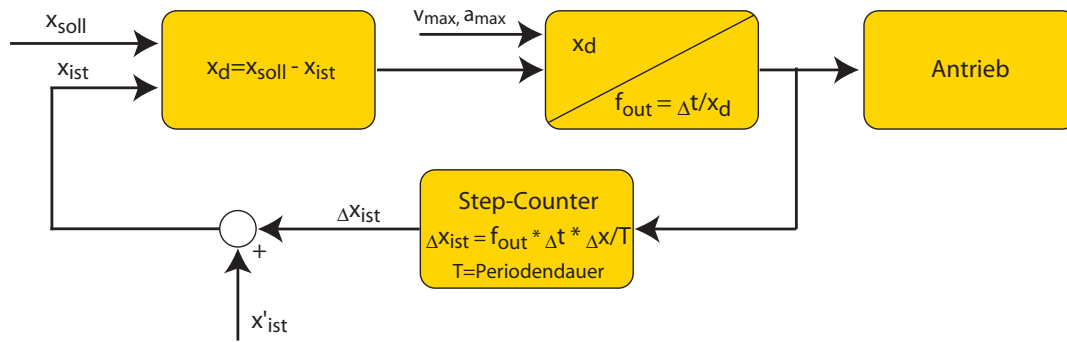


Abbildung 2.6: Der Positionsregler berechnet autonom die notwendige, neue Steuergröße für die Motoren. Als Eingangsgröße wird nur ein Set von vier Parametern verwendet, (X, Y, Z, α).

Mit den zusätzlichen Bedingungen für einen ruhigen Lauf:

$$v_{motor} \leq v_{max} \quad (2.4)$$

$$\Delta v_{motor} < a_{max} \quad (2.5)$$

Das Modul für die Kommunikation mit dem Mikroskop befindet sich auch in der ersten Schicht. Das Mikroskop wird mittels einer seriellen Schnittstelle und einem string-basierten Protokoll angesteuert. Die Daten werden in diesem Modul in die proprietäre Form der Hardware-Schicht gebracht [vgl. Abb.

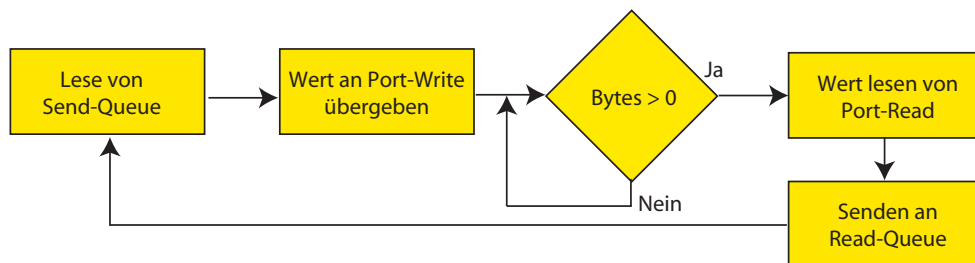


Abbildung 2.7: Die Hardware-Schicht des Mikroskops arbeitet zyklisch einen Schreib-, Leseprozess ab. Die Hauptaufgabe des hier gezeigten Prozesses ist das Auslesen der Send-Queue und versenden der darin enthaltenen Daten. Da die Kommunikation nach dem Ping-Pong Prinzip arbeitet, wird der weitere Ablauf angehalten, bis vom Mikroskop ein Wert gelesen wird. Die Daten eines erfolgreichen Leseprozesses werden an die Empfangs-Queue weitergeleitet.

2.7].

Middleware-Schicht

Die Middleware ist das eigentliche Herz des Systems. Hier laufen alle Kommandos zusammen und hier steckt die Logik und Funktionalität. Die wesentliche Aufgabe der Middleware ist es, Befehle aus der darüberliegenden Schicht entgegenzunehmen, diese zu interpretieren und entsprechend umformatiert an das Gerät, sprich die Hardware-Schicht, weiterzuleiten. Zusätzlich werden in dieser Schicht Daten vom Instrument empfangen, entsprechend angepasst und an die Verbindungs-Schicht weitergeleitet. Die Aufgaben dieser Schicht ist es also, das Kommunikations-Protokoll des Mikroskops an das Protokoll⁴ der dezentralen Client-Applikationen anzupassen. Die Definition für die Umwandlung der Protokolle beruht auf einer eindeutigen, bijektiven Transformations-Tabelle, die als externe Datei geladen wird und die alle möglichen Befehle des spezifischen Mikroskops beinhaltet. Möchte man mit der hier präsentierten Software ein anderes Mikroskop ansteuern, muss lediglich der Hardware-Schicht angepasst und diese Transformations-Tabelle angepasst werden. Damit die Erweiterbarkeit des Systems möglichst flexibel bleibt, ist es wichtig, das Protokoll für die Kommunikation mit der externen Infrastruktur stark zu abstrahieren und es möglichst einfach zu halten. Das RAFM verwendet aus diesem Grund ein Key-Value Protokoll mit der Form:

$$\text{command} = \text{set} \quad \text{name} = \text{scanrange} \quad \text{value} = 100 \quad (2.6)$$

Dieses Protokoll kann mit nahezu jeder Applikation erzeugt werden, die in der Lage ist, textbasierte Daten der Form 2.6 über ein TCP/IP Netzwerk zu versenden. Nebst der Protokoll-Transformation ist die Middleware verantwortlich für das Sicherheitsmanagement und die Koordination von Controller und Observer, die in Kapitel 3.3 näher besprochen werden. Unter Sicherheitsmanagement fallen diverse logische Verknüpfungen, die die Betriebssicherheit des Systems erhöhen. Dazu gehören:

1. Das Auswerten von Passwortabfragen
2. Verhindern, dass makroskopische Verschiebungen durchgeführt werden, wenn der Messkopf abbroached ist
3. Die automatische Justierung des Probenstisches
4. Streng sequentiell Ausführung von Befehlen

Verbindungs-Schicht

Die Aufgabe der Verbindungsschicht ist die Anbindung des Geräteservers an die Netzwerkinfrastruktur, in diesem Fall TCP/IP, basierend auf Ethernet Technologie. Die Verbindungsschicht arbeitet mit zwei Sockets pro Client: Einem Kanal für die Befehle und Status-Meldungen und einem Kanal für die Scandaten. Der ersten Kanal wird als Event-Channel und der zweiten als Stream-Channel bezeichnet. Der Geräteserver verbindet sich im normalen Betrieb nicht direkt mit den unterschiedlichen Client-Applikationen, weil nahezu jede Netzwerkinfrastruktur heute mittels Firewalls⁵ geschützt ist. Dies ermöglicht es, auf das Gerät von extern, das heisst in unserem Fall von ausserhalb des universitären Netzes, zuzugreifen. Um dieses Problem zu umgehen, arbeitet das hier vorgestellte Konzept mit einem Zwischenrechner, der ausserhalb des geschützten Bereiches, der demilitarisierten Zone (DMZ), installiert ist. Dieser Rechner heisst in unserem Fall Kommando-Broadcaster [vgl. Kapitel 2.2.5].

⁴Ein Protokoll ist eine Kommunikationsabmachung die den Datenaustausch zwischen zwei oder mehr datenverarbeitender Parteien erlaubt.

⁵Eine Firewall erlaubt keinen Verbindungsaufbau, der von ausserhalb des zu schützenden lokalen Netzwerkes initiiert wird.

2.2.4 Client-Applikation

Die Client-Applikation ist das Bedienpanel des RAFM. Mit diesem Programm kann sich ein Benutzer mit dem Mikroskop verbinden und das Instrument bedienen.

Ein grosser Vorteil der Client-Applikation ist die Möglichkeit der freien Erweiterbarkeit. Durch einfaches Ergänzen oder Abändern des LabVIEW Programms können Ideen neuer Funktionalitäten umgesetzt werden oder bereits implementierte Ansätze verändert werden. So ist es zum Beispiel sehr einfach, die grafische Aufmachung der Bedienoberfläche den persönlichen Bedürfnissen anzupassen. Ermöglicht wird dies durch den bereits erwähnten modularen Aufbau der Software.

2.2.5 Kommando Broadcaster

Der Kommando Broadcaster ist das Bindeglied zwischen dem lokalen Netzwerk (LAN), in dem das RAFM eingebettet ist und den unterschiedlichen Client-Applikationen, die sich ausserhalb des lokalen Netzes (WAN) befinden. Eine wichtige Aufgabe, die diesem Element zukommt, ist das Verteilen der Daten an die unterschiedlichen Benutzer. Mit Daten ist in diesem Zusammenhang die gesamte Datenkommunikation zwischen RAFM und Clients gemeint. In diese Gruppe fallen alle Status- und Bilddaten vom Gerät, die durch den Kommando Broadcaster an die Clients gesendet werden. Ebenfalls in diese Gruppe fallen die Daten, die von einem spezifischen Client zurück an das Gerät gesendet werden. Diese werden vom Kommando Broadcaster an alle anderen verbundenen Client-Applikationen repliziert. So wird sichergestellt, dass alle Benutzer mit den selben Einstellungen arbeiten.

Eine weitere Aufgabe des Kommando Broadcaster ist die Überwachung der verschiedenen Netzwerkverbindungen. Wird zum Beispiel eine Client-Applikation vorzeitig beendet, muss die entsprechende Verbindung beendet und die verwendeten Ressourcen müssen frei gegeben werden.

2.2.6 Videosever

Auf diesen Teil der Software wird nur am Rande eingegangen, da es sich um eine kommerzielle Lösung handelt. Dennoch ist die Verwendung von Videoinformation von grosser Wichtigkeit. Der visuelle Eindruck hilft nicht nur bei der Positionierung der Messspitze auf bestimmte Oberflächenstrukturen. Im Folgenden werden die wesentlichen Elemente der Videoaufbereitung und Übertragung vorgestellt.

Bildquelle

Als Bildquelle dient eine klassische CCD Kamera, die als Ausgangssignal ein analoges Composite-Signal liefert. Das analoge Videosignal wird mit einer einfachen Elektronik in ein digitales Format gebracht und mit einer USB Schnittstelle auf den Rechner übertragen.

Broadcaster

Die Aufgabe des Video-Broadcaster [41] ist die Datenaufbereitung für den Transport über ein Netzwerk. Die Aufbereitung besteht im Wesentlichen aus der Kompression der Videoinformation zur Reduktion der Datenmenge. In dieser Arbeit wurde der Quicktime Broadcaster von Apple verwendet.

Streamings-Server

Der Streamings-Server [42] verteilt die komprimierte Videoinformation an die verschiedenen Benutzer. Ähnlich dem Kommando-Broadcaster befindet sich der Streamings-Server in einer Netzwerkzone ausser-

halb eines geschützten Bereiches. So wird sichergestellt, dass keine Schwierigkeiten durch Verletzungen des Zugriffsrechts entstehen. Als Streamings-Server wurde der ebenfalls von Apple frei zur Verfügung gestellte Quicktime Streamings-Server verwendet.

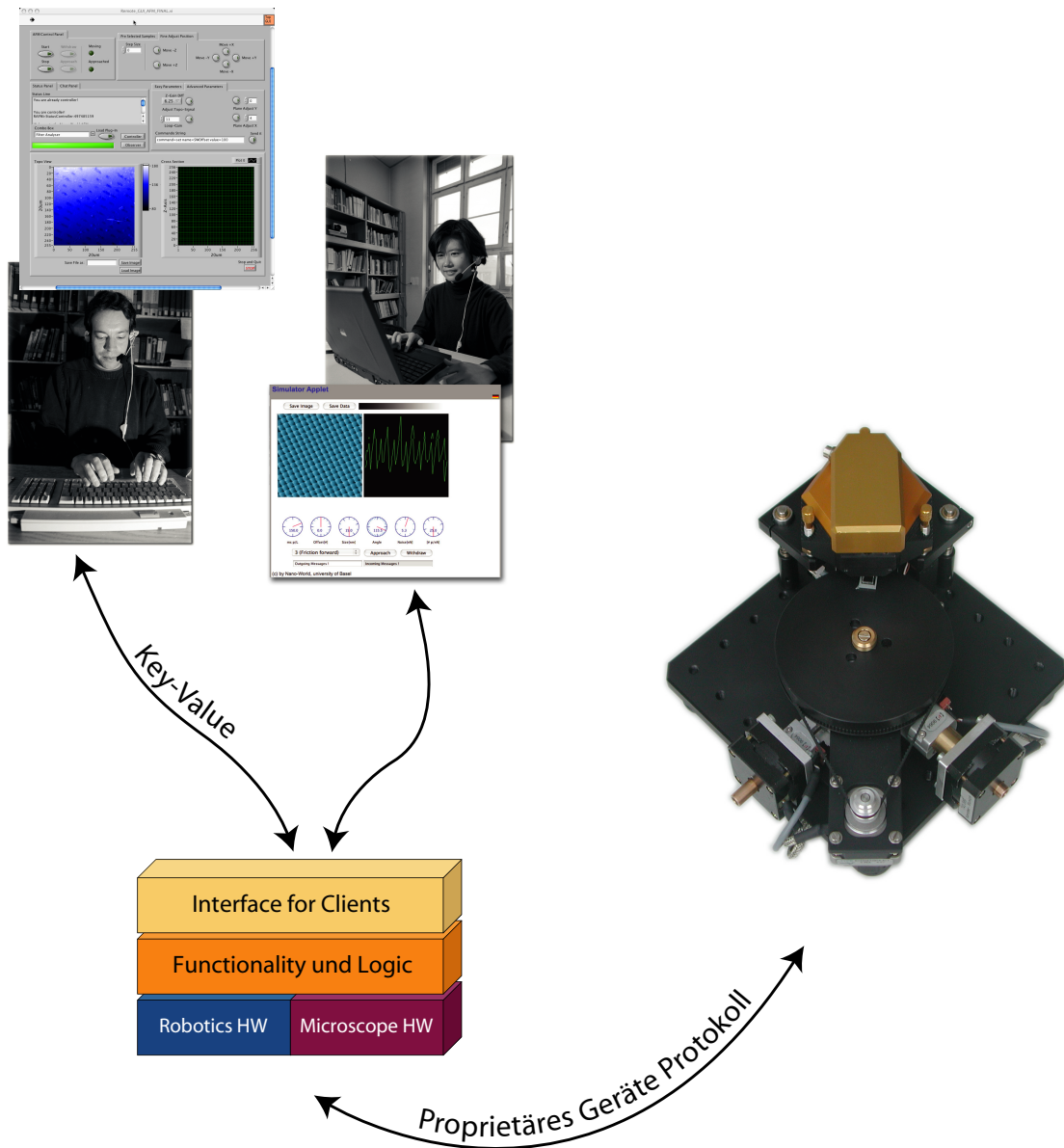


Abbildung 2.8: Das im RAFM-System verwendete Key-Value Konzept eignet sich ideal als Kommunikationsmittel. Es erlaubt eine vielfältige Gestaltung der Benutzeroberfläche. Einzige Bedingung an das Graphical User Interface (GUI): Es muss ein textbasiertes Paket per Internet versenden können. Die Aufgabe der Middleware ist es, dieses abstrakte Format in die proprietäre Form des Mikroskops zu bringen.

3 Pädagogische Konzepte des RAFM

3.1 Ausbildung in drei Stufen

Ein in der Forschung eingesetztes Raster Kraft Mikroskop ist ein Instrument von ausserordentlicher Komplexität, gebaut um ein Maximum an Auflösung beim Abtasten von Oberflächen zu erreichen. Oftmals sind die im universitären Umfeld eingesetzten Geräte über längere Zeit für eine spezifische Aufgabe entwickelt worden. Sie sind in einigen Fällen nicht ausreichend dokumentiert und setzen einiges an spezifischer Erfahrung voraus, um mit ihnen zu arbeiten und sie ohne Fehlmanipulationen bedienen zu können. Um diese Instrumente, die untrennbar mit der Nanowissenschaft verknüpft sind, Studierenden näher zu bringen, ist es unumgänglich, diese langsam an die Funktionsweise und die Eigenheiten eines solchen Gerätes heranzuführen. Wie aber soll diese Aufgabe der Ausbildung optimal gelöst werden? Um diese Frage zu beantworten, wurde die grosse Erfahrung von Ausbildern anderer, hochkomplexer Instrumente detailliert betrachtet: moderne Flugzeuge. Beim Swiss Aviation Training Center (SAT) in Basel werden geeignete, flugbegeisterte Personen in mehreren Schritten zu Piloten ausgebildet. Diese Ausbildung kann in drei Stufen aufgeteilt werden:

1. In einer ersten Stufe wird den potentiellen Piloten Grundlagenwissen vermittelt. Diese Know-How wird frontal, in klassischer Schulumgebung unterrichtet. Die Grundlagen beinhalten die Kommunikationsregeln im Flugfunk, Luftverkehrsregeln oder physikalische Grundlagen der Aviatik.
2. In einer zweiten Stufe wird die Bedienung von wichtigen Geräten erlernt. Dieses Training von Fähigkeiten, oftmals Skills-Training genannt, hilft, Handgriffe zu verinnerlichen, um sie in kritischen Situationen reflexartig zu beherrschen. Das Skills-Training erfolgt an Simulationen (CBT¹) in Form von Applikationen an normalen PCs . Um den Erfolg der Ausbildung zu beurteilen, werden immer wieder Tests durchgeführt, um sowohl dem Lernenden als auch dem Lehrenden eine aufschlussreiche Rückmeldung über den Lernstand zu geben.
3. Nach erfolgreichem Absolvieren der Stufen eins und zwei, werden komplexere Handgriffe in einem Full-Flight-Simulator trainiert. Zu diesen Handgriffen gehören Landeanflüge, Starts, Flugmanöver und das optimale Verhalten in Notsituationen. Die Flugzeiten im Simulator werden so verteilt, dass die Maschine 24h in Betrieb bleiben kann.

Der Grund für diese Ausbildung in drei Stufen, liegt in der nachgewiesenen Effizienz mit dem damit verbundenen Einsparpotential. Eine Stunde Full-Flight-Simulator kostet rund CHF 1000.- und kann nicht dazu eingesetzt werden, um das Handling des Autopiloten zu trainieren.

Die Analogie zwischen den beiden Apparaten, dem Flugzeug und dem Raster-Kraft-Mikroskop ist nicht offensichtlich. Beides sind jedoch hochkomplexe Apparate, bei denen Fehlmanipulation beträchtliche Folgen verursachen können und die beide ein hohes Mass an Wissen und Fähigkeiten voraussetzen. In dem hier präsentierten Ausbildungskonzept für Instrumente der Nanowissenschaften wird dieses dreistufige Verfahren in weiten Teilen übernommen.

¹CBT steht für Computer Based Training: Eine Form des autonomen Lernens am Computer mit Hilfe von Programmen.

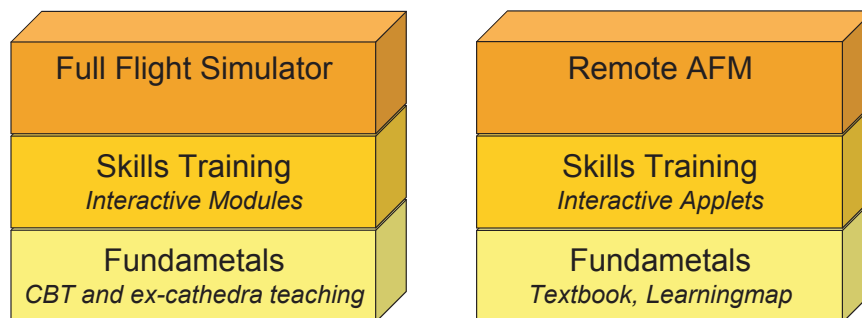


Abbildung 3.1: Das dreistufige Ausbildungskonzept wurde aus der Aviatik übernommen. Moderne Flugzeuge haben vieles mit den High-Tech Geräten der Nanowissenschaft gemein. Es benötigt einiges an spezifischem Hintergrundwissen und viel Erfahrung beim Bedienen der Steuerung, um das Gerät sicher und effizient bedienen zu können.

1. In einer ersten Stufe wird den Studierenden Grundlagenwissen der Nanowissenschaften vermittelt. Dieses Wissen wird vorwiegend frontal unterrichtet, allerdings wird der Unterricht durch selbständig abzuarbeitende Lektionen im Rahmen der virtuellen Lernumgebung Nano-World ergänzt. Solche Grundlagen sind z. B. die Theorie hinter dem Messprinzip eines Raster-Kraft-Mikroskopes, Grundlagen über Strukturen mit der Längenausdehnung im Nano-, oder Mikrometerbereich oder Definitionen des spezifischen Vokabulars.
2. In einer zweiten Stufe wird den Studierenden die Möglichkeit gegeben, die gewonnen Kenntnisse an Simulationssoftware zu vertiefen und anzuwenden. Dieses Vertiefen hilft, grundlegende Begriffe und deren Bedeutung zu verstehen. Das Training an Simulatoren wird selbständig abgearbeitet und durch entsprechende Prüfungen getestet.
3. Nach der Erarbeitung der wesentlichen Begriffe, die zur Steuerung eines solchen Gerätes der Nanowissenschaften notwendig sind, und die durch vertieftes Anwenden mit den Simulatoren verinnerlicht wurden, kann die auszubildende Person reale Messungen mit dem RAFM durchführen. Die Tatsache, dass ein echtes Gerät eingesetzt wird, bringt einige Vorteile mit sich. Zum einen sind alle realen Vorkommnisse automatisch mit einbezogen, was selbst beim Einsatz eines hochwertigen Simulators nicht in allen Feinheiten möglich ist, zum Zweiten wird so die Motivation, Messungen durchzuführen, deutlich erhöht.

3.2 Kollaboratives Lernen am realen Gerät

Der kollaborative Ansatz ist ein weiterer wesentlicher Punkt in unserem Ausbildungskonzept zur Steuerung eines realen Instruments. Die Bemühungen, kollaboratives Lernen [43], also gemeinsames Lernen im Team, durch den Einsatz von Computern zu unterstützen und verbessern, sind relativ neu. Möglich wurde dies durch vernetzte Computer, die immer mehr in die Lern- und Arbeitswelt Einzug halten.

Kollaboratives Lernen und Arbeiten bezeichnet eine Form der Interaktion, bei der die Mitglieder einer Gruppe gemeinsam und im wechselseitigen Austausch Kenntnisse und Fertigkeiten erwerben. Dabei sind alle Gruppenmitglieder gleichberechtigt am Geschehen beteiligt und tragen gemeinsam dafür Verantwortung. Kollaboratives Lernen besteht aus einer Vielzahl gemeinsamer Aktivitäten. Die Lernenden legen

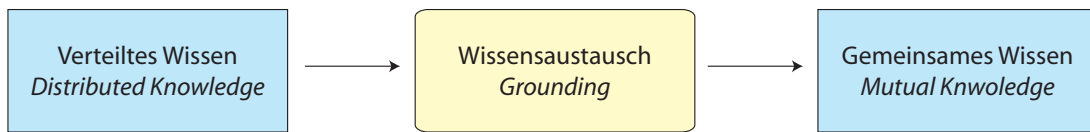


Abbildung 3.2: Bringt jeder Teilnehmer sein individuelles Vorwissen in die Gruppe ein, wo durch Kommunikation ausgetauscht wird und was zur Erweiterung des persönlichen Wissens eines jeden Gruppenmitgliedes führt, wird von "Grounding" gesprochen.

Ziele fest, strukturieren ihr Vorgehen, erzeugen, wählen und modifizieren Alternativen, testen Hypothesen, bewerten. Die Wissenskonstruktion kann dabei durch fokussierte Diskussions- und Interaktionsprozesse unterstützt werden: Jeder Lerner entwickelt eigene Gedanken, die er verbalisiert und auf die er in einem Dialog Rückmeldungen erhält. Bei konträren Positionen muss jedes Gruppenmitglied seine Position vertreten und in daraus entstehenden Diskussionen reflektieren. Entscheidungen fallen aufgrund einer Synthese bzw. Informationsintegration, wodurch Synergieeffekte ermöglicht werden. Ausgangspunkt und Kern des kollaborativen Lernens ist die Gruppe [44, 45]. Dabei ist zu unterscheiden zwischen dem eigentlichen Lernprozess im engeren Sinne, der immer individuell ist und sich innerhalb einer Person vollzieht und der Lernsituation im allgemeinen, die gerade im Kontext von Computerunterstützung auch sozial gestaltet sein kann [46]. Das Wissen der Gruppe ist zu Beginn der Kooperation auf die einzelnen Teilnehmer verteilt (Distributed-Knowledge). Jeder Teilnehmer bringt also sein individuelles Vorwissen in die Gruppe ein, wo es dann durch die Kommunikation ausgetauscht wird und zur Erweiterung des persönlichen Wissens eines jeden Gruppenmitgliedes führt. Dieser Austausch- und Erweiterungsprozess wird als Grounding bezeichnet. In ihm bewirkt die Kommunikation, dass alle Teilnehmer am Ende über den gleichen Kenntnisstand verfügen (Mutual-Knowledge). Ziel des kollaborativen Lernens ist nun, dass das in der Lerngruppe vorhandene Wissen zum Schluss der Zusammenarbeit zu einem möglichst großen Anteil allen Teilnehmern bekannt ist. Die Ausbildung im naturwissenschaftlichen Grundstudium ist in vielen Belangen ein Gruppenprozess. Sowohl die Vorlesungen, die Übungen zu Themen mit theoretischem Hintergrund, als auch die Praktika werden in Gruppen mit unterschiedlicher Mitgliederzahl besucht. Soll nun der Unterricht mit E-Learning Elementen wie dem hier vorgestellten RAFM ergänzt werden, so gilt es, die Ausbildung an diesem Gerät möglichst optimal in das bestehende Umfeld einzubinden. Das setzt aber voraus, dass alle drei Stufen - die Grundlagen, das Skills-Training am Simulator wie auch die Bedienung am realen Gerät – von Gruppen benutzt werden können. Die daraus folgenden Vorteile sind wie oben bereits angedeutet:

- Auftretende Schwierigkeiten können gemeinsam diskutiert und gelöst werden.
- Eine kompetitive Atmosphäre bedingt durch das gemeinsame Arbeiten von Studierenden mit dem gleichen Background erhöht die Effizienz meist ungemein.
- Der Wissenstransfer durch Kommunikation der individuellen Gruppenmitglieder schlägt sich im so genannten Grounding nieder, was einen optimalen Lernerfolg erlaubt.

Die Ausbildung in der ersten Stufe, den Grundlagen, ist ohnehin problemlos in Gruppen möglich und wird frontal unterrichtet. Die zweite Stufe, das Arbeiten am Simulator ist mittels entsprechenden technischen Massnahmen ebenfalls kollaborativ umsetzbar. Herausforderungen ergeben sich bei der Steuerung des Geräts durch mehrere gleichzeitige Benutzer. Manipulieren unterschiedliche Benutzer die gleichen Einstellungen des Gerätes zur selben Zeit, kann das relativ schnell zu einem unkontrollierbaren Verhalten führen. Vor allem bei der Änderung von mechanischen Parametern wie der Position der Probenrobotik

können Fehlfunktionen auftreten. Sendet ein Benutzer zum Beispiel das Kommando zum Verringern des Abstands zwischen Spitze und Probe, dauert es rund 5 bis 10 Sekunden bis der entsprechende Feedback im Videosignal zu erkennen ist. Die eigentliche Positionsänderung passiert allerdings nahezu instantan. Orientiert sich ein Anwender ausschliesslich am Videobild, kann es passieren, dass er in der Zwischenzeit ein weiteres Kommando, das ebenfalls den Spitzen-Proben Abstand verringern soll, absetzt, obwohl dies einen Spitzencrash verursachen kann. Diese Fehlmanipulation ist die Folge der Systemlaufzeit.

3.3 Controller/Observer Prinzip

Ziel ist es nun, die oben beschriebene Situation zu umgehen, ohne auf die individuelle Mitarbeit aller Projektmitglieder verzichten zu müssen und so den kollaborativen Aspekt zu verlieren. Um dieses Dilemma zu lösen, wird bei der Ansteuerung des RAFM zwischen der direkten Manipulation des Gerätes und der Auswertung und Visualisierung der mit dem Gerät erzeugten Daten unterschieden. Sind mehrere

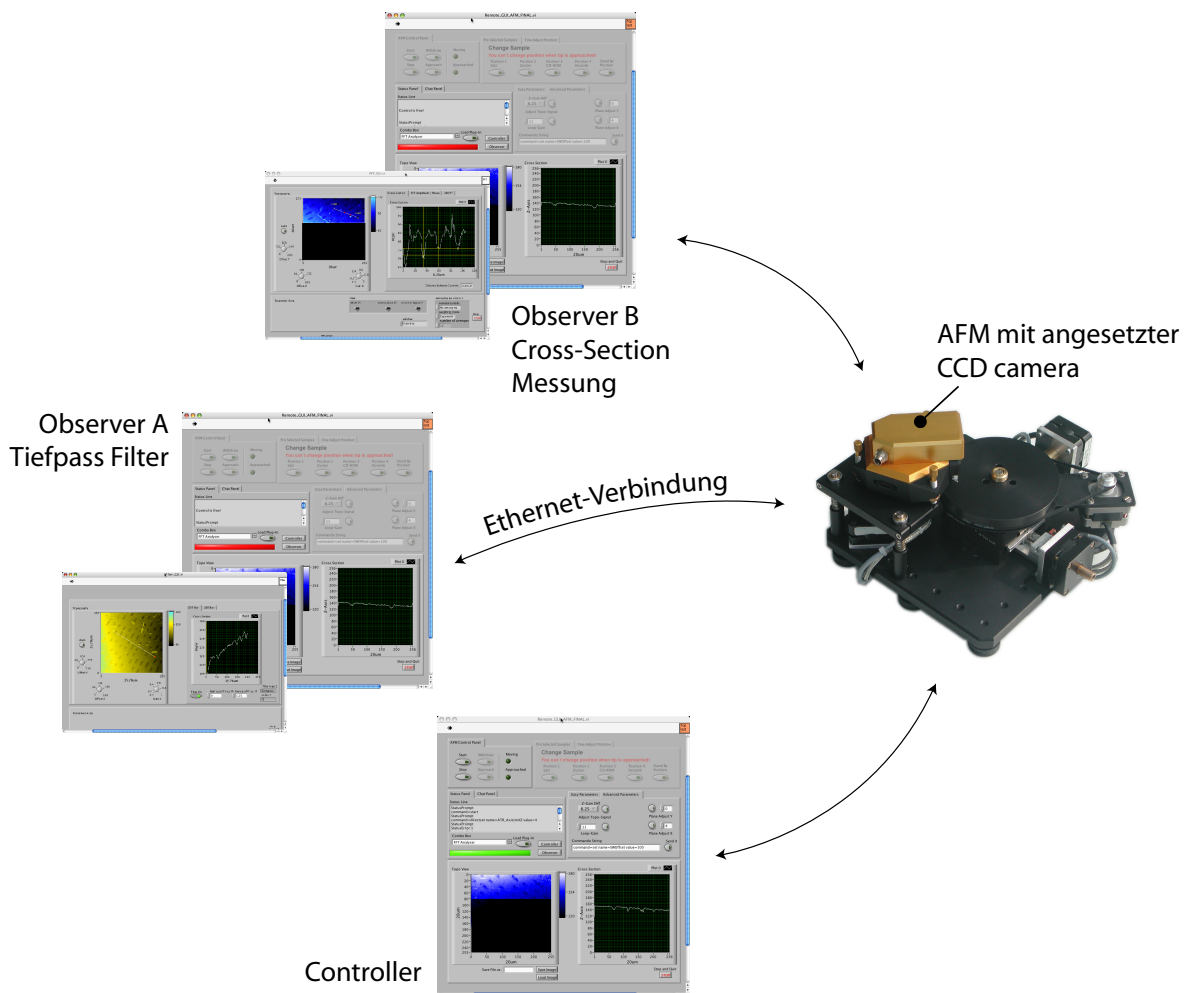


Abbildung 3.3: Die Observer können durch vielfältige Hilfsmittel unabhängig und individuell vom Controller Messungen durchführen.

Benutzer mit dem RAFM verbunden, so sind alle in der Lage, bereits laufende Messungen zu beobachten und individuelle Analysen der Messwerten durchzuführen. Zur Analyse stehen dem Benutzer unterschiedliche Module zur Verfügung. Sie ermöglichen es Messungen an Strukturen im Bild durchzuführen. Im Aufsichtsbild (Topographie) kann die Position eines Längsschnitts definiert werden, der in einem entsprechenden Anzeigefeld dargestellt wird. In diesem Längsschnitt können mittels zweier Cursor Distanzen ausgemessen werden. Weitere Module erlauben es die Daten zu mit einem Hoch-, oder Tiefpass zu filtern, in ein oder zwei Dimensionen in den Frequenzraum zu transformieren oder ein Histogramm der Höhenwerte zu berechnen. Jeder Benutzer kann im Weiteren die Visualisierung der Messwerte nach den eigenen Vorstellungen anpassen. Diese Einstellmöglichkeiten sind im Speziellen die Farbe, der dargestellte Wertebereich und der Kontrast der Messwerte. So erlangte Messresultate können in einer ebenfalls in der Client-Applikation integrierten Chat-Box ausgetauscht und diskutiert werden. Wird das Gerät in diesem eher beobachtenden aber dennoch nicht passiven Modus betrieben, so wird vom Observer-Modus gesprochen.

Soll eine Messung gestartet, gestoppt oder in ihren grundlegenden Parametern verändert werden, so muss einer der Benutzer sich als „Controller“ beim System anmelden. Der Controller-Modus erlaubt nun die volle Kontrolle über das Gerät. Messungen können gestartet und gestoppt, zu untersuchende Objekte gewechselt und Positionen fein justiert werden. Der Vollzugriff wird nur einem der Benutzer gewährt, allerdings haben alle Benutzer die Möglichkeit, vom Observer zum Controller Modus zu wechseln. Der monopolistische Ansatz verhindert, dass die oben erwähnten chaotischen oder eventuell das Gerät gefährdenden Mehrfachmanipulationen entstehen können. Die Erlaubnis zum Steuern wird durch ein deutlich sichtbares Indikatorfeld mit roter und grüner Farbe symbolisiert und durch eine entsprechende Textmeldung bestätigt.

Zusammengefasst erlaubt das hier präsentierte Konzept eine Mischform zwischen einer reinen Einzelplatzlösung und einem kollaborativen Ansatz, der allen völlige Gleichberechtigung erlaubt.

3.4 Anfänger/Experten Mode

Bei der Entwicklung der Steuersoftware war neben dem kollaborativen Aspekt wichtig, dass Benutzer mit unterschiedlichem Vorwissen und unterschiedlichen Wünschen das Gerät schnell und sicher bedienen können. Oftmals sind die Benutzerschnittstellen von Applikationen überladen und das Zurechtfinden auf der Oberfläche des Programms fällt schwer. Vor allem, wenn eine Software wie in unserem Fall zu Ausbildungszwecken eingesetzt werden soll, ist die einfache Handhabung entscheidend für die erfolgreiche Durchführbarkeit einer Lektion.

Der hier verwendete Ansatz erlaubt ein Anpassen der Bedienfunktionen an Personen mit unterschiedlichem Vorwissen. In der zu Dissertationsende verwendeten Version sind zwei Benutzermodi implementiert. Diese Modi unterschiedlicher Komplexität werden Beginner- und Experten-Modus genannt. Im Beginner-Modus wird der Benutzer von Einstellmöglichkeiten höherer Komplexität ferngehalten und nur mit Parametern und Steuerfunktionen konfrontiert, die geringes Vorwissen voraussetzen. Die Reduktion auf die wesentlichen Bedienelemente bewahrt den Benutzer zum einen vor Überforderung und erlaubt es andererseits, typische Fehlmanipulationen, die zu einem Defekt des Gerätes führen können, abzufangen. Naturgemäß wird durch diese Reduktion an Bedienelementen die Funktionalität des Geräts eingeschränkt. Welcher Modus im Programm aktiv ist, wird durch umschaltbare, karteikartenähnliche Panels festgelegt. Dies ermöglicht es, den Experten-Modus für einzelne Kategorien von Parametern oder Funktionen ein und auszuschalten. So kann zum Beispiel beim einen Benutzer nur das Experten-Panel für die manuelle Veränderung von Positionen freigegeben werden, bei einem anderen das Experten-Panel für die Einstellung von Mess-Parametern. Das Umschalten vom Beginner-Modus zum Experten-Modus ver-

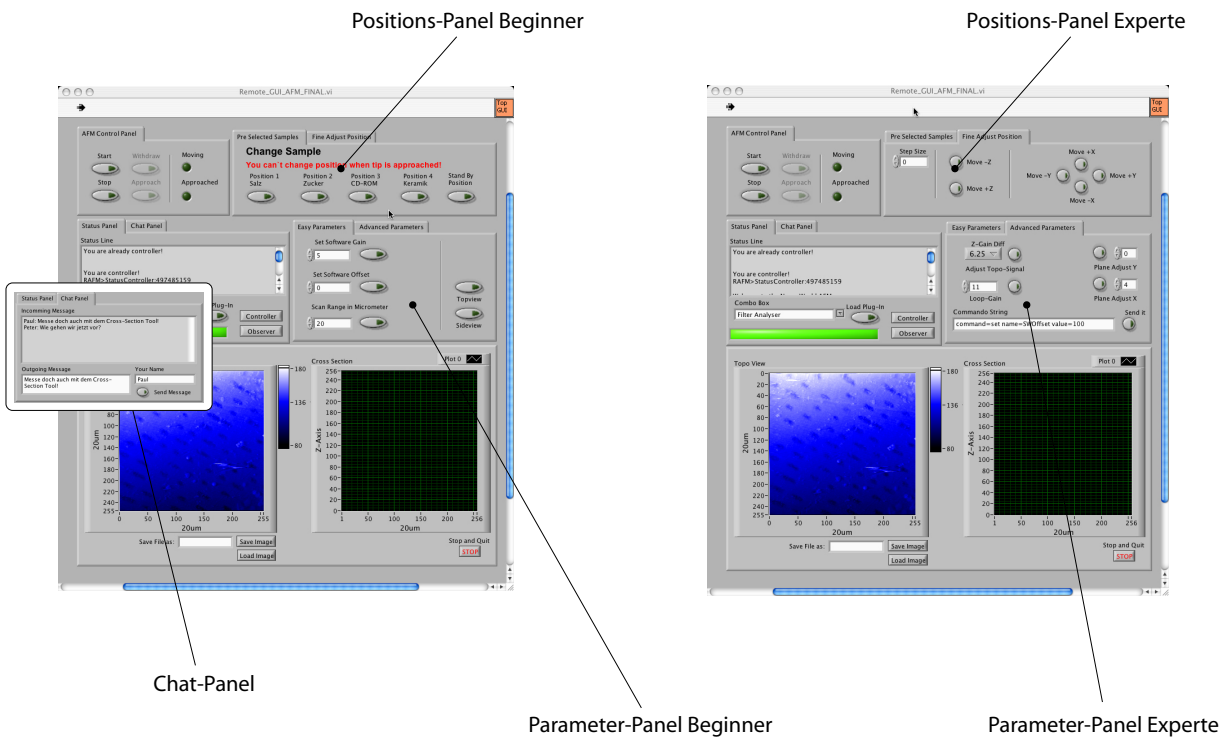


Abbildung 3.4: Die RAFM Client-Applikation kann zur Laufzeit vom Beginner- zum Expertenmodus umgeschaltet werden. Der Modiwechsel erfolgt durch karteikartenähnlich angeordnete Panels, die mit Bedienelementen ausgestattet sind, deren Funktionen sich in der Komplexität unterscheiden. Die Umschaltung zum Expertenmodus verlangt eine Passwortheingabe. Die Anzahl und Art der Modi ist frei erweiterbar.

langt die Eingabe eines Passwortes, das unabhängig von der eigentlichen Zugangsberechtigung vergeben werden kann. Dies erlaubt es, die Benutzerschnittstelle zur Betriebszeit umzuschalten. Diese Möglichkeit ist vor allem im Einsatz in einem Praktikumlabor mit vielen Leuten, die nur wenig gerätespezifisches Hintergrundwissen besitzen – zum Beispiel Gymnasiasten - von grosser Bedeutung. Ist nur der Betreuer im Besitz des Expertenpasswortes, wird verhindert, dass Fehlmanipulationen stattfinden. Vor allem bei grossen Gruppen, die nicht von einer Einzelperson beaufsichtigt werden können, ist das von Vorteil. Das erlaubt den Einsatz eines Hightech Gerätes mit Personen von sehr unterschiedlichem Wissensstand.

4 Die Abbildungsqualität des Mikroskops

Abbildung 4.1 zeigt eine massstabsgetreue Skizze einer Messspitze eines Rasterkraft Mikroskops und einer nahezu idealen Oberfläche einer Referenzstruktur vom Typ TGZ03 [47] [vgl. Abbildung 4.2]. Man erkennt gut die Grössenverhältnisse zwischen dem im Modell angenommenen Spitzenradius, dem Schaft der Spitze und der Strukturhöhe.

Im hier verwendeten Raster-Kraft Mikroskop wird eine Spitze vom Typ CONTR von Nanosensors [48] verwendet. Die Spitze hat folgende Spezifikationen:

- Cantilever-Dicke $2\mu\text{m}$
- Mittlere Cantilever-Breite $50\mu\text{m}$
- Cantilever-Länge $450\mu\text{m}$
- Federkonstante 0.2 N/m
- Resonanzfrequenz 13 kHz
- Spitzenwinkel um 25 Grad
- Spitzenradius besser als 10 nm
- Spitzenhöhe ist $10\text{-}15\ \mu\text{m}$

Bildet man eine Oberfläche vom Typ TGZ03 mit der spezifizierten, realen Spitze ab, so wird die Geometrie der Messspitze an der idealen Struktur mit abgebildet. Es ist bekannt, dass bei klein gewählten Z-Auflösungen sowohl der Spitzenradius als auch der Spitzenwinkel direkt aus den Messwerten ermittelt werden kann [49, 50, 51]. Bei einer praxisnahen, charakteristischen Strukturhöhe von 500 nm fällt der Einfluss des Spitzenradius von 10 nm vernachlässigbar gering aus. Der Messkopf selbst besitzt ein Auflösungsvermögen in der Grössenordnung von theoretischen 0.3 nm , sofern das Rauschen des Systems vernachlässigt wird. Die Messdaten werden nach der Aquisition für die Visualisierung auf dem Computer auf 8bit Werte reduziert. Um die Struktur optimal darstellen zu können, muss für die Z-Achse ein Bereich von 750 nm gewählt werden. Bei 256 möglichen Werten ergibt das pro Pixelwert einen Wert

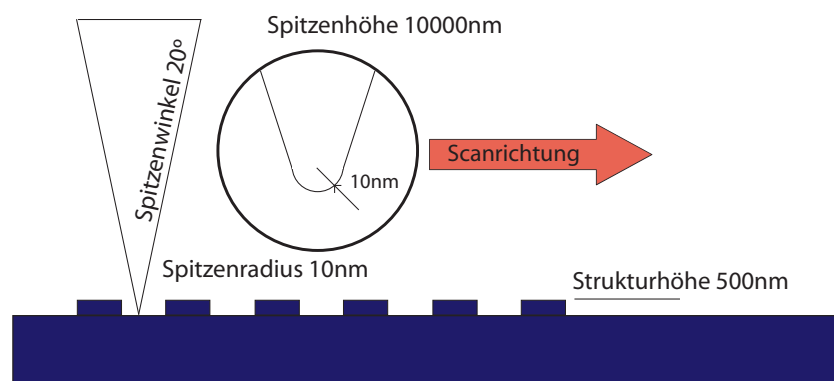


Abbildung 4.1: Die Grafik zeigt Grössenverhältnisse zwischen der zu messenden Struktur und der Spitze. Der Spitzenradius von spezifizierten 10 nm ist sehr klein gegenüber der Höhe der Struktur.

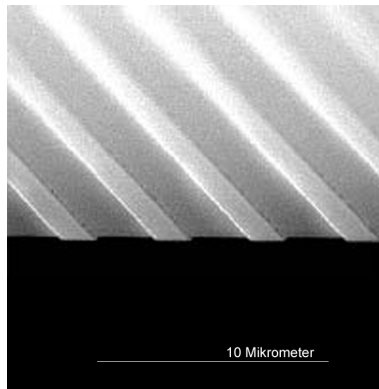


Abbildung 4.2: Eine kommerziell erhältliche Referenzstruktur mit der Bezeichnung TGZ03. Die Struktur zeichnet sich durch eine aussergewöhnlich grosse Kantenschärfe aus. Die Struktur besitzt eine Kantenhöhe von 500 nm und einen Pitch von $3\mu\text{m}$.

für Δz von 2.92 nm, womit der Radius mit nur drei Pixeln dargestellt werden kann. Bei solch einer geringen Pixelauflösung sind keine verlässlichen, reproduzierbaren Resultate betreffend dem effektivem Spitzenradius möglich. Anders verhält es sich mit dem Winkel der Messspitze. Dieser Winkel kann vor allem bei relativ grossen Strukturhöhen direkt durch die Abbildung der Spitze an der scharfen Kante der Struktur - in unserem Fall dem TGZ03 - abgelesen werden. Der Winkel der Messspitze hat direkt mit der maximalen Bildschärfe und mit dem damit verbunden Auflösungsvermögen, der Abbildungsleistung des Mikroskops, zu tun. Eine Analogie aus dem Gebiet klassischer, optischer Systeme zeigt wieso: Wird mit einem optischen System ein idealer Lichtpunkt abgebildet, so entsteht im Bild auf Grund von Beugungseffekten eine Scheibe mit einem gaussverteilten Helligkeitsabfall. Dieser Verlust an Kantenteilheit bedeutet unmittelbar eine Verringerung der Bildschärfe und somit eine Reduktion der maximalen Abbildungsleistung des optischen Systems. Analog einem optischen System, darf die maximale, durch die Geometrie der Spitze gegebene, mögliche Randschärfe als Mass für die Qualität der Abbildungsleistung eines Raster-Kraft Mikroskops angenommen werden. Der Spitzenwinkel kann somit als Qualitätsfaktor für die Abbildungsleistung verwendet werden. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass für Proben mit Strukturen im Bereich von einigen hundert Nanometer bis Mikrometer der Spitzenwinkel ausschlaggebend für die Abbildungsleistung ist, wohingegen im atomaren Bereich der Spitzenra-

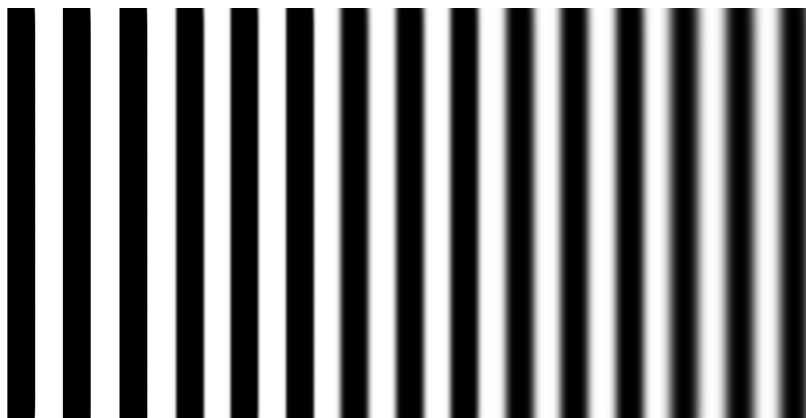


Abbildung 4.3: Die vertikalen Muster, entsprechen der Referenzstruktur TGZ03. Von rechts nach links nimmt der Grad an Unschärfe zu. Die Analogie zum Spitzenwinkel des Messensors ist naheliegend.

dius und evtl. darauf haftende Einzelatome entscheidend für die maximal mögliche Abbildungsleistung sind [52, 53].

Wirken Reibungskräfte an der Kontaktfläche zwischen Spitze und Probe, so treten oft Verschleisserscheinungen auf [54, 55, 56]. Sowohl die Spitze als auch die Probe können durch den Messprozess mechanisch modifiziert werden. Die verschleissbedingte Veränderung der Geometrie führt zu einer von der Benutzungszeit der Spitze abhängenden Verstärkung der Messfehler.

Strukturen, die aus einem Herstellungsprozess hervorgehen, besitzen gewisse Fertigungstoleranzen. Wird eine Messspitze mit einer nicht konstant bleibenden Geometrie über längere Zeit für die Kontrolle der Qualität der Strukturen eingesetzt, so ist nicht mehr klar zu trennen, welche Fehler tatsächlich auf eine fehlerhafte Struktur zurück zu führen sind und welche durch die Veränderung der Spitze neu hinzukommen. Aus diesem Grund ist es wichtig, den Zustand der Messspitze genau beziffern zu können.

Wird beabsichtigt, ein Raster-Kraft Mikroskop über längere Zeit z. B. in der Qualitätssicherung autonom einzusetzen, ist der Aspekt der Abbildungsqualität und der damit verbundenen Spitzenlebensdauer von grosser Bedeutung. Ein Spitzenwechsel ist nach wie vor mit einer Messpause und einem operativen Eingriff verbunden, eine Situation, die es zu vermeiden gilt. In den folgenden Kapiteln wird die Abbildungsqualität der Instrumentierung untersucht und Artefakte die die Abbildungsqualität mindern werden analysiert.

4.1 Artefakte durch Systemkomponenten

Ein Raster-Kraft Mikroskop ist ein komplexer Apparat, der nur durch den Einsatz von unterschiedlichen Systemkomponenten in der Lage ist, Bilder darzustellen. Die wesentlichen Komponenten des Systems sind die abtastende Spitze und die benötigte Regeleinrichtung, bestehend aus Regler und Stellglied [57, 58]. Die Bilder der Messungen beinhalten im Normalfall drei Komponenten: Die gewünschte Oberflächenstruktur, den durch die Bewegung über die Struktur bewirkten Einfluss der Regeleinrichtung und den Einfluss der Spitzengeometrie [vgl. Abb. 4.4]. *Die Daten einer Messung einer Oberfläche mit einem Raster-Kraft Mikroskop setzen sich aus der Struktur und den charakteristischen Eigenschaften des Messgerätes zusammen.* Die Regeleinrichtung wird beim hier verwendeten Mikroskop benötigt, um

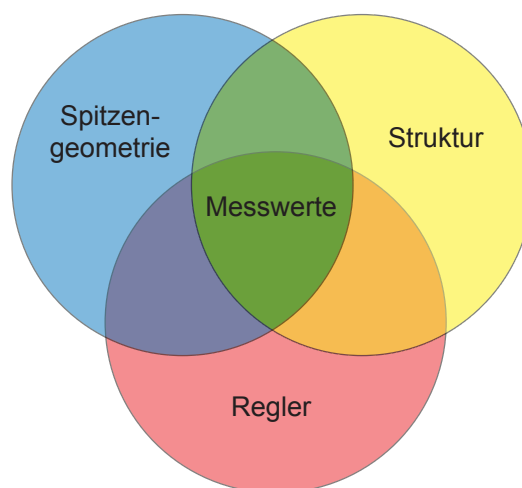


Abbildung 4.4: Die Messwerte des Abtastvorganges werden durch die Kombination dreier wesentlicher Elemente definiert. Durch die Geometrie der Spitze, den Einfluss der Regeleinrichtung und durch die Struktur selbst.

den Federbalken mit konstanter Druckkraft, im Constant Force-Mode über die Struktur zu bewegen. Der Regler selbst vergleicht dabei laufend die aktuelle, anliegende Kraft mit dem Vorgabewert, dem Sollwert. Das Stellglied ist nichts anderes als ein Umformer, der die im Regler berechnete Ausgangsgrösse in Arbeit umsetzt. Im Falle eines Raster - Kraft Mikroskops wird diese Arbeit durch das Nachführen des Federbalkens (Cantilevers) relativ zur Oberfläche geleistet. Bei vielen Mikroskopen ist dieses Stellglied durch Piezokristalle verwirklicht, im Falle des easyScanTMAFM durch Tauchspulen in Dauermagneten. Diese Einrichtung zur Kontrolle der Messspitzenbewegung optimiert zwar den Messprozess als solchen, beeinflusst aber durch das eigene Übertragungsverhalten die Messdaten. Die Artefakte der Regeleinrichtung können durch geeignete Massnahmen reduziert, z. T. sogar eliminiert werden.

Die typischen Artefakte des Messprinzips, bedingt durch die Geometrie der Spitze, kommen noch zu den Fehlern der Regeleinrichtung hinzu. Bei der Geometrie der Spitze wird zwischen dem Spitzenwinkel und dem Spitzenradius unterschieden [vgl. Kapitel 4]. Die Artefakte, die durch die Spitzengeometrie verursacht werden, können nicht beseitigt werden, da sie unmittelbar aus dem Messprinzip folgen.

4.2 Einfluss der nicht idealen Regeleinrichtung

Prinzipiell kann man die Artefakte der Regeleinrichtung ganz beseitigen, indem vollständig auf die Regeleinrichtung verzichtet wird und im Constant-Height Mode gemessen wird. Dieses Verfahren hat allerdings zur Folge, dass die Druckkraft zwischen der Messspitze und der Oberfläche proportional mit der Strukturhöhe moduliert wird und somit zu falschen Messresultaten führen kann. Bei sehr grossen Höhenunterschieden der Struktur kann dies sogar zum Bruch des Cantilevers führen.

Um den Einfluss des Reglers im Constant-Force Mode auf die Messdaten zu berücksichtigen, muss entweder die Wirkung der Regeleinrichtung kompensiert, oder die Ursache des Einflusses minimiert werden. Die Kompensation der Artefakte durch entsprechendes Subtrahieren ist prinzipiell möglich, benötigt aber ein exaktes physikalisches Modell der zu regelnden Strecke. Dieses Modell muss alle relevanten Eigenschaften der unterschiedlichen Komponenten des Systems berücksichtigen. Dazu gehören die Spitzen-Oberflächen Interaktion, das Übertragungsverhalten der Regeleinrichtung sowie das dynamische Verhalten des Cantilevers.

Um diesen nichttrivialen Ansatz zu vermeiden, wird in dieser Arbeit die zweite Variante gewählt und es werden zwei Vereinfachungen vorgenommen. Zum einen wird davon ausgegangen, dass anhand einer rein qualitativen Änderung der Messwerte einer definierten Struktur Aussagen über den Spitzenzustand getätigt werden können. Zum zweiten wird vorausgesetzt, dass die Abtastgeschwindigkeit beliebig gross gewählt werden kann.

4.2.1 Die Wirkung der Abtastgeschwindigkeit

Der negative Effekt der Verfälschung der Messwerte durch das Regelsystem ist um so grösser, je schneller das anregende Signal ist, das heisst je schneller abgetastet wird und je steiler die Strukturflanken sind. Das heisst, die Wirkung der Regeleinrichtung beim Abtasten einer Referenzstruktur mit einer Spitze, deren Geometrie sich im Laufe der Zeit verändert, schlägt sich als nicht konstante Verfälschung in den Messwerten nieder, auch wenn die Parameter der Regeleinrichtung nicht verändert werden. *Die Ursache der Reglerartefakte liegt in der bereits erwähnten Schwingfähigkeit des Regelkreises. Diese Schwingfähigkeit kann nahezu vollständig reduziert werden, wenn die anregenden Frequenzen weit unter der Eigenfrequenz des Systems liegt.* Dies kann erreicht werden, wenn die Abtastgeschwindigkeit sehr klein gehalten wird und der Sonderfall der quasistationären Abtastung betrachtet wird. Quasistationär heisst in diesem Zusammenhang, die Abtastgeschwindigkeit wird so weit reduziert, dass Effekte des Reglers vernachlässigbar werden.

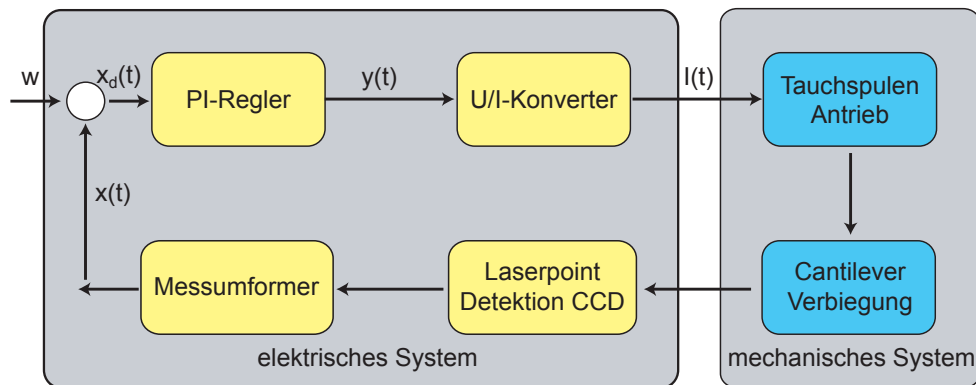


Abbildung 4.5: Die wesentlichen Elemente eines Regelkreises. Der Regler generiert eine Ausgangsgrösse $y(t)$ auf Grund der Regeldifferenz x_d . Als Strecke wird die zu beeinflussende Grösse bezeichnet. Beim AFM im Contact-Mode wäre das der Anpressdruck. Das Stellglied wandelt das elektrische Ausgangssignal des Reglers in eine Positionsänderung um, so dass durch die Federkonstante des Cantilevers ein entsprechender Anpressdruck entsteht. Der Sensor, in diesem Falle ein Flächen CCD, misst die Bewegungsänderung und im Messumformer wird daraus wieder eine Anpresskraft berechnet.

Um das Ausmass der Effekte der Regeleinrichtung darzustellen, wurde das zeitliche Verhalten des Messgerätes bei der Messung einer endlich steilen Kante simuliert. Das in der Simulation verwendete Übertragungsverhalten des Regelkreises ist stark vereinfacht. Es besteht aus einem idealen P-Regler und einem kaskadierten PT_2 IT_1 System, das den Aktuator des Messkopfes darstellt. Die endliche Steilheit entspricht dem Abtastvorgang einer idealen Kante mit einer geometrisch kegelförmigen Spitze. Der PT_2 Term entspricht dem dynamischen Verhalten eines gedämpften Feder-Masse Systems - dem Federbalken - mit der Differentialgleichung 4.1. Der kaskadierte IT_1 Term widerspiegelt die Mechanik zum Antrieb des Federbalkens. Im hier verwendeten Gerät besteht diese aus elektrischen Spulen und trägen dauermagnetischen Kernen. Dieser Teil des Aktuators besitzt das dynamische Verhalten des Ausdrucks 4.3. Die Eingangsgrössen der Übertragungsglieder werden mit $x_e(t)$ bezeichnet, die Ausgangsgrössen folgen mit $x_a(t)$. K_{PT_2} und K_{IT_1} bezeichnen die in der Systemtechnik üblichen einheitenlosen Verstärkungsfaktoren, die sich aus dem Quotienten von $x_a(t)/x_e(t)$ berechnen. Es wird davon ausgegangen, dass $x_a(t)$ und $x_e(t)$ die selben Einheiten [mV] besitzen. Das Ausgangssignal $x_a(t)$ wird durch den Ausgang des Positionssensors, der die Federbalkenverbiegung misst, geliefert. Die Eingangsgrösse $x_e(t)$ steuert den Aktuator. Der Wert von D bezeichnet die Dämpfung des gedämpften harmonischen Oszillators, ω_0 seine Eigenfrequenzen.

Für das Übertragungsverhalten ist im wesentlichen der Bodeplot von Interesse. Dieser sagt aus, wie sich der Quotient $x_a(t)/x_e(t)$ in Abhängigkeit von der Frequenz verhält. Den Bodeplot der Teilsysteme K_{PT_2} und K_{IT_1} erhält man direkt durch die Laplace-Transformation der Gleichungen des dynamischen Verhaltens. Die Ausdrücke 4.2 und 4.4 entsprechen den Laplace-Transformierten der genannten Differentialgleichungen. Der Bodeplot der Teilsysteme wird in Abbildung 4.6 gezeigt. Der Bodeplot des Gesamtsystems folgt aus der additiven Überlagerung der Übertragungsverhalten der Teilsysteme. Das Übertragungsverhalten der elektronischen Komponenten wird als ideal angenommen, da deren Grenzfrequenz deutlich höher liegt als die des mechanischen Systems.

Der Ausdruck für das dynamische Verhalten des Feder-Masse Systems PT_2 :

$$\frac{1}{\omega_0^2} \ddot{x}_a(t) + \frac{2D}{\omega_0(t)} \dot{x}_a(t) + x_a(t) = K_{PT} x_e(t) \quad (4.1)$$

Die Laplace-Transformierte des PT_2 Elements:

$$F(s) = K_{PT} \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2D}{\omega_0} s + 1} \quad (4.2)$$

Der Ausdruck für das dynamische Verhalten des Spulen-Antriebs IT_1 mit der Verstärkung K_{IT} , die definiert, wie schnell der Integrator aufsummiert, und der Verzögerungszeit T_{IT} , die definiert, wie lange es dauert, bis der Antrieb anspricht:

$$T_{IT} \dot{x}_a(t) + x_a(t) = K_{IT} \int x_e(t) dt \quad (4.3)$$

Entsprechend die Laplace-Transformierte des IT_1 Elements:

$$F(s) = \frac{1}{K_{IT} s(1 + T_{IT} s)} \quad (4.4)$$

Bei entsprechend gewählter Dämpfung ($D < 1$) zeigt das einem Tiefpass sehr ähnliche Gesamtsystem

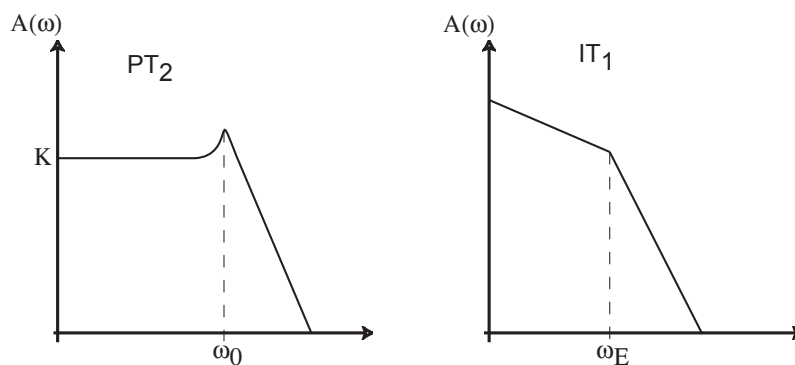


Abbildung 4.6: Die Amplitudengang eines PT_2 und eines IT_1 Elementes. Die Frequenzen ω_0 und ω_E bezeichnen die Grenzfrequenzen bei der die Ausgangsgrößen $A(\omega)$ -3dB kleiner sind als die stationären Verstärkungen. Die Frequenzüberhöhung bei ω_0 ist hauptverantwortlich für das Schwingen des Systems. Oberhalb der Grenzfrequenz nimmt die Dämpfung schnell zu.

ein Resonanzverhalten bei ω_0 und einer Dämpfung von $-60 \frac{\text{dB}}{\text{dekade}}$ bei $\omega > \omega_0$. ω_E ist die Grenzfrequenz des Spulenantriebs, die in der selben Größenordnung angenommen wird wie ω_0 . Im geschlossenen System ist die gemessene Überschwingung von der anregenden Frequenz abhängig, somit von der Abtastgeschwindigkeit und der Struktur.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Regeleinrichtung bei sehr langsamen Geschwindigkeiten (in Abbildung 4.7 durch die dickere, blaue Linie dargestellt) der Struktur gut folgen kann. Wird die Geschwindigkeit kontinuierlich erhöht, nimmt das Überschwingen und die Welligkeit des Regelsignals deutlich zu.

Bild 4.8 zeigt das selbe Verhalten im realen Experiment. Mit kontinuierlicher Reduktion der Abtastgeschwindigkeit wird die effektive Form der gemessene Struktur immer besser wiedergegeben. Deutlich ist auch das asymptotische Verhalten sichtbar. Bild 4.9 zeigt, dass oberhalb einer kritischen Abtastzeit die Einflüsse auf einem sehr geringen Niveau sind und dort konstant bleiben. Die in Bild 4.7 simulierten, geschwindigkeitsabhängigen Effekte korrelieren mit den in Bild 4.8 real erhaltenen Daten sehr gut. *Man darf also davon ausgehen, dass bei einer quasistationären Abtastung die Reglerartefakte vernachlässigbar gering ausfallen.*

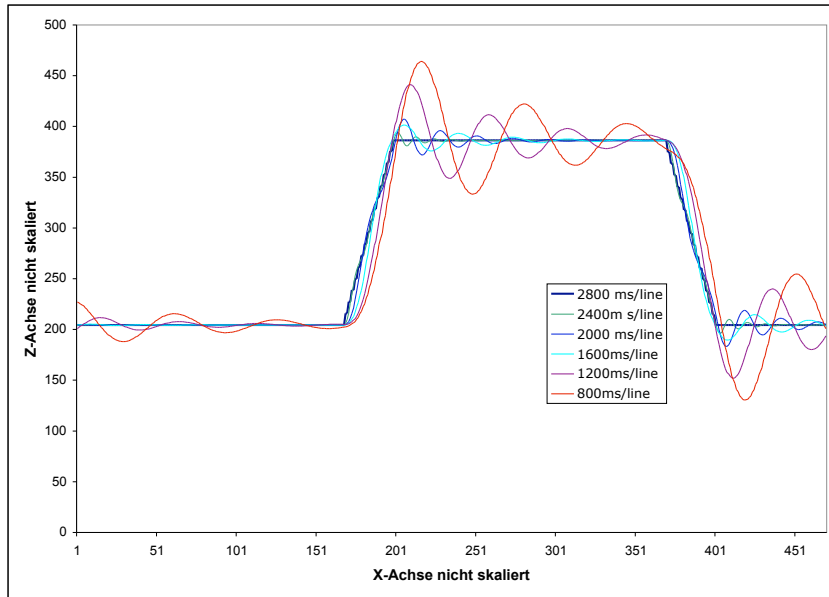


Abbildung 4.7: Eine Simulation zeigt, dass die Wirkung des Reglers auf die Messwerte bei unveränderten Regelparametern stark von der Abtastgeschwindigkeit abhängig ist. Die Neigung der Flanken entspricht einer scharfen Kante, die mit einer kegelförmigen Spitze abgetastet wird. Das Überschwingen und die Welligkeit werden nur durch das Verhalten der Regeleinrichtung verursacht. Die stärkere, blaue Linie entspricht einer sehr langsamen Abtastgeschwindigkeit, die weit unter der Eigenfrequenz des Systemen liegt.

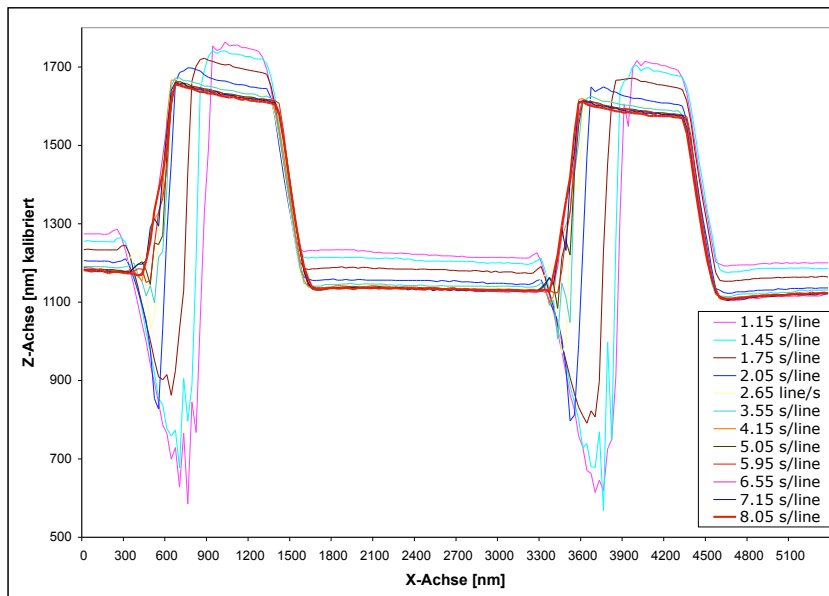


Abbildung 4.8: Kurvenschar der Messung einer bekannten Struktur abhängig von der Abtastgeschwindigkeit. Deutlich zu erkennen sind die starken Einflüsse der Reglereinrichtung, die mit abnehmender Geschwindigkeit sinken. Wird von einem asymptotischen Verlauf ausgegangen, darf für sehr langsame Abtastgeschwindigkeiten der quasistationäre Fall angenommen werden.

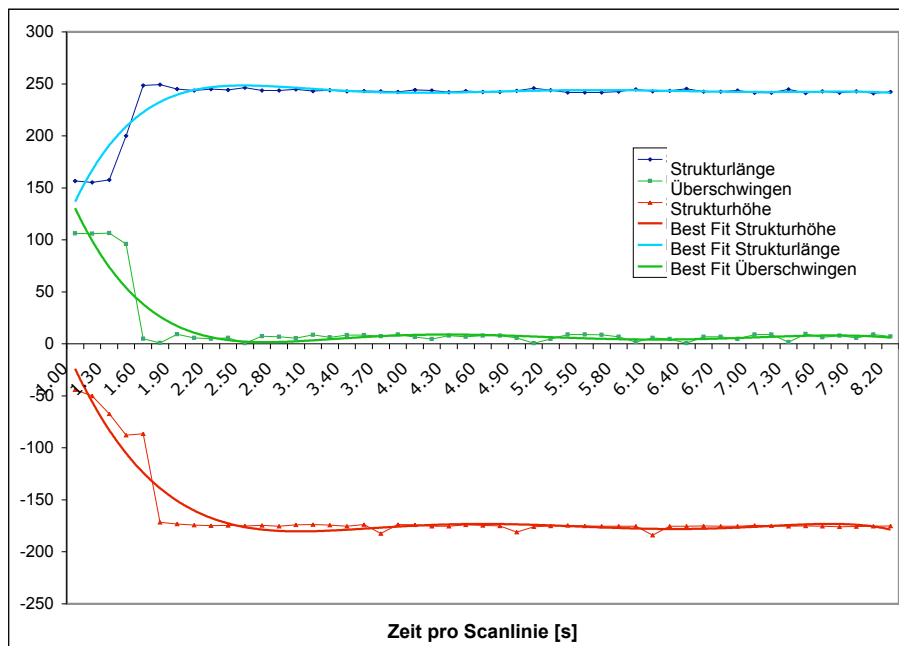


Abbildung 4.9: Der Graph zeigt die Entwicklung dreier Parameter der Kurvenschar aus Abbildung 4.8. Der blaue Verlauf zeigt das Verhalten der gemessenen Strukturbreite, der grüne Verlauf zeigt, wie stark der Regler überschwingt und der rote Verlauf zeigt die gemessene Strukturhöhe. Die Werte sind qualitativ angegeben.

4.2.2 Die Wirkung der Regler-Charakteristik

Formel 4.5 zeigt den Ausdruck der Stellgröße $y(t)$ in Abhängigkeit von x_d , der Differenz zwischen Soll- und Istwert. Der gezeigte Ausdruck entspricht einem klassischen PID-Regler.

$$y(t) = K_p x_d(t) + \int_{t-T}^t K_i x_d(t') dt' + K_d \frac{dx_d}{dt} \quad (4.5)$$

Die Faktoren K_p , K_i und K_d bezeichnen die in der Systemtechnik üblichen einheitenlosen Verstärkungsfaktoren des entsprechenden Übertragungsglieds. Der P-Teil, als reines Proportionalglied besitzt ein sehr einfaches Verhalten. Der D-Teil entspricht einem Differenzialglied, das auf Änderungen der Regeldifferenz reagiert. Diese Komponente ist für unsere Anwendung nicht geeignet, da es sich um ein schnelles System handelt, in dem eine differenzielle Komponenten die Schwingneigung des Systems stark verstärkt. Im Allgemeinen wird eine D-Komponente nur in Regelsystemen eingesetzt, wenn es sich um relativ langsame Regelstrecken handelt, bei denen der Regler sehr schnell auf bereits kleinste Veränderungen reagieren muss. Solche Systeme sind z.B. die Temperatur eines Raumes oder der Füllstand eines grossen Behälters. Der I-Teil des Reglers wird durch einen Integrator definiert, der grundsätzlich notwendig ist, um die zu regelnde Grösse genau auf den Sollwert zu bringen, so dass im eingeschwungenen, stationären Zustand $x_d = 0$ wird. Ausdruck 4.6 beschreibt das Übertragungsverhalten eines reinen I-Gliedes.

$$y(t) = K_i \int_{-\infty}^t x_d(t') dt' \quad (4.6)$$

Sei der stationäre Zustand zur Zeit $t = T_0$ mit $x_d = 0$ eingetreten:

$$y(t) = K_i \int_{-\infty}^{T_0} x_d(t') dt' + K_i \int_{-T_0}^t K_i x_d(t') dt' \quad (4.7)$$

Man erkennt unmittelbar, dass das Integral des Intervalls $[-T_0, t]$ gleich null ist und sich somit der Ausdruck auf das Integral des Intervalls $[-\infty, T_0]$ reduziert und der vergangene konstante Wert beibehalten wird.

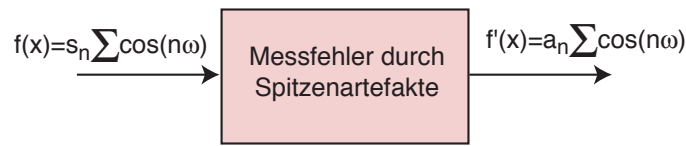
Ein reiner P- oder PD-Regler ist nur im Stande, eine Regelgrösse genau auf den Sollwert zu bringen, wenn die Verstärkung K_p unendlich gewählt wird; eine Einstellung, die in der Realität nicht möglich ist. Selbst sehr gross gewählte Verstärkungen führen zur Oszillation des Systems. Der differenzielle sowie der integrierende Teil eines Reglers mit der starken Zeitabhängigkeit kompliziert das System in puncto dynamischem Verhalten. Vor allem das Integral-Glied eines Reglers mit seinem Speicherverhalten kann bei ungünstig gewählten Parametern sehr grosse Zeitkonstanten aufweisen und die Messung selbst bei geringen Abtastgeschwindigkeiten beeinflussen. Um Aussagen bezüglich der effektiven Spitzengeometrie machen zu können, wird versucht, die Wirkung der Regeleinrichtung möglichst zu minimieren. Das kann erreicht werden, in dem das Regelsystem auf ein einfaches, proportionales Verhalten beschränkt wird. Für diese Anwendung bedeutet das, dass keine absoluten Aussagen über den Verschleiss oder die Veränderung der Spitze gemacht werden können, sondern nur relativ zu einer Referenzmessung auf einer Referenzstruktur wie dem Modell TGZ03 der Firma Micromash, [Bild 4.2] die als konstant angenommen wird. Da aber die Geometrie unterschiedlicher Spitzen nicht als gegeben angenommen werden kann, sind Referenzmessungen ohnehin nicht vermeidbar. Konkret wird das Regelsystem vereinfacht, indem der I-Regler als Integrator ausgeschaltet, das heisst $K_i = 0$ gesetzt wird.

4.3 Einfluss der nicht idealen Messspitze

In Kapitel 4 wurde gezeigt, wie die abbildende Spitze durch ihre nicht ideale Form zu einer Verringerung der Abbildungsleistung führt. Diese Reduktion der Abbildungsleistung ist die Folge eines Informationsverlustes, der durch die nicht ideale Spitzengeometrie verursacht wird.

Für die Art und die Stärke der Artefakte ist massgeblich die Form der Messspitze verantwortlich, da der Informationsverlust beim Abtasten durch die Faltung der Messdaten mit der Funktion der Messspitze entsteht. Das Modell der Spitze entspricht für viele Anwendungen einer Halbkugel mit einem Radius von ca. 10 nm die auf einem Kegel liegt. Dieses Modell, die damit verbundenen Auswirkungen auf die Messwerte und die Möglichkeiten der Rekonstruktion wurde bereits eingehend in der Fachliteratur behandelt [7]. Selbst wenn die explizite Spitzenform nicht bekannt ist, kann durch sogenannte "Blind-Reconstruction" Methoden [59] die Form der Spitze näherungsweise direkt aus den Messdaten bestimmt werden. Durch Entfaltung mit diesen Näherungswerten kann wiederum der Einfluss der Artefakte reduziert werden, so dass das Abbild der Oberfläche verbessert wird.

Im hier vorgestellten Fall ist die Struktur sehr gross gegenüber dem Spitzenradius und die Artefakte werden ausschliesslich durch die konische Form der Spitze verursacht. Im folgenden Kapitel wird das Ausmass der Artefakte auf die Form der ursprünglichen Oberfläche analytisch betrachtet.



Transferfunktion der Messspitze = a_n / s_n

Abbildung 4.10: Die Messspitze besitzt ein spezifisches Übertragungsverhalten, das ähnlich wie die Filter der Systemtechnik als Bodeplot dargestellt werden kann, indem das Verhältnis von Ausgangsgrösse zu Eingangsgrösse frequenzabhängig dargestellt wird.

4.3.1 Die Transferfunktion der Messspitze

Die reale Oberfläche $f(x, y)$, oder im einfacheren Fall eine abgetastete Zeile $f(x)$, kann nach der Theorie von Fourier als Summe von Frequenzen ω_n dargestellt werden, deren Amplitude durch den Koeffizienten s_n quantifiziert wird [vgl. Ausdruck 4.8].

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} s_n \cdot \cos(n\omega) \quad (4.8)$$

Bis zu einer Grenzfrequenz ω_g , die abhängig ist vom Spitzenwinkel, der Amplitude und der Frequenz der zu messenden Struktur, ist die Spitze in der Lage, die Oberfläche korrekt abzubilden. Oberhalb der Grenzfrequenz wird die Messung der Struktur durch den linearen Verlauf der Spitze verformt [vgl. Abb. 4.12]. Die gemessene Oberfläche bildet sich in diesem Fall aus der Kombination der realen Oberfläche und der Geometrie der Spitze.

Das Spektrum der gemessenen Oberfläche verändert sich zu:

$$f'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega) \quad (4.9)$$

Die Koeffizienten a_n beschreiben die artefakthaltigen Frequenzkomponenten des Spektrums des Messsignals. Der Quotient s_n/a_n sagt somit aus, wie stark die Veränderung der entsprechenden Frequenz $n\omega$ ausfällt. Für $s_n/a_n = 1$ ist keine Messwertverfälschung feststellbar. Die Koeffizienten a_n der resultierenden Oberfläche können durch den generellen Ausdruck E.1 berechnet werden:

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{-\frac{T}{2}} f(x) \cos(n\omega x) dx \quad (4.10)$$

Die somit erhaltenen Frequenzkomponenten repräsentieren die zu messende Oberfläche. Für die weiteren Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass nur die ersten beiden Komponente a_0 und a_1 für unsere Messung von massgeblicher Relevanz sind. Die Komponente a_0 entspricht dem DC-Offset der Messung, die Komponente a_1 der Korrigation - das heisst der Welligkeit - der Oberfläche.

4.3.2 Der Form-Faktor der Messspitze

Es liegt nahe, dass die Stärke der Artefakte von der Geometrie der Spitze und der Skalierung Frequenzkomponente abhängt. Wird zum Beispiel die Amplitude oder die Frequenz der zu untersuchenden Oberfläche vergrößert, muss der Spitzenwinkel kleiner sein, damit eine vergleichbare Situation herrscht. Wir definieren aus diesem Grund einen Form-Faktor, der die Größenverhältnisse zwischen Oberfläche und Spitze festlegt:

$$C = \frac{m}{A\omega} \quad (4.11)$$

Die Variable A bezeichnet die Amplitude der jeweiligen Frequenzkomponente der Oberfläche, ω die Frequenz und m die Steigung der Spitze.

Unter Verwendung des Form-Faktors C können drei Phasen der Abtastung unterschieden werden [vgl. Anhang 3.3]:

Phase I: $C < 0,725$

In dieser Phase kann die Spitze nur die oberen Wellenteile der Oberfläche richtig darstellen. Die unteren Bereiche, den "Täler" bleiben der Spitze verborgen.

Phasenübergang: $C = 0,725$

In diesem Sonderfall berührt die Spitze die Oberfläche an drei Punkten, an der tiefsten Stelle der Korngation und an zwei symmetrisch liegenden Kontaktstellen.

Phase II: $0,725 < C < 1$

In dieser Phase ist die Spitze steiler als im Fall zuvor, aber weniger steil als die steilste Stelle der Oberfläche. *In diesem sehr interessanten Bereich kann die Spitze die Berge und Täler der Oberfläche sehen, nicht aber die Steigungen!*

Phasenübergang: $C = 1$

In diesem Fall besitzt die Spitze eine Steigung, die grösser ist als die grösste Steigung der Oberfläche, also der Steigung beim Nulldurchgang des Cosinus der Komponente a_1 .

Phase III: $C > 1$

In dieser Phase wird Oberfläche ohne Artefakte abgebildet.

Der komplizierteste Fall tritt für $0,725 < C < 1$ auf. Befinden sich die geometrischen Größenverhältnisse in diesem Rahmen, werden beim Abtasten von $f(x)$ fünf Bereiche unterschieden:

1. Der Bereich, in dem die Messspitze den ansteigenden Teil des "Tales" des Oberflächenverlaufes artefaktfrei misst (R3).
2. Der Bereich, in dem die vorauseilende Flanke der Spitze in Kontakt mit der Oberfläche steht und somit die Steigung der Flanke der Spitze abgebildet wird (R2).
3. Der Bereich, in dem die Spitze selbst in Kontakt mit der Oberfläche steht und der Struktur sauber folgen kann (R1).
4. Der Bereich, in dem die nacheilende Flanke der Spitze in Kontakt mit der Oberfläche steht und ebenfalls die Steigung der Flanke der Spitze abgebildet wird (R2).
5. Der Bereich, in dem die Messspitze den abfallenden Teil des "Tales" des Oberflächenverlaufes artefaktfrei misst (R3)

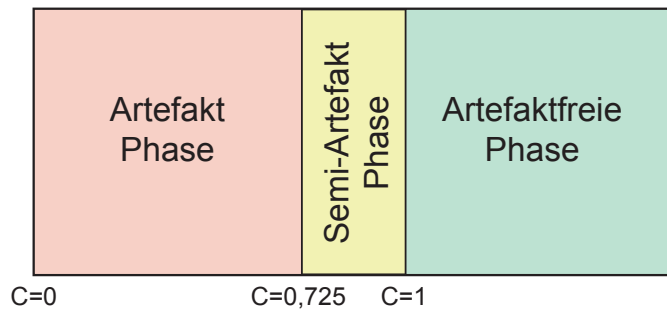


Abbildung 4.11: Durch den Form-Faktor C werden drei Phasen unterschieden. In Phase I kann die Oberfläche nur mit Artefakten abgebildet werden, die Stärke der Artefakte kann analytisch beschrieben werden. In Phase II werden alle Wellentäler durch Artefakte überlagert. In Phase III kann die Oberfläche ebenfalls nur mit Artefakten abgebildet werden, allerdings sind hier Berge und Täler der Oberfläche sichtbar, nicht aber gewisse Steigungen. In Phase III ist bedingt durch eine transzendente Gleichung keine analytische Lösung möglich. In Phase III kann die Oberfläche ohne Artefakte abgebildet werden.

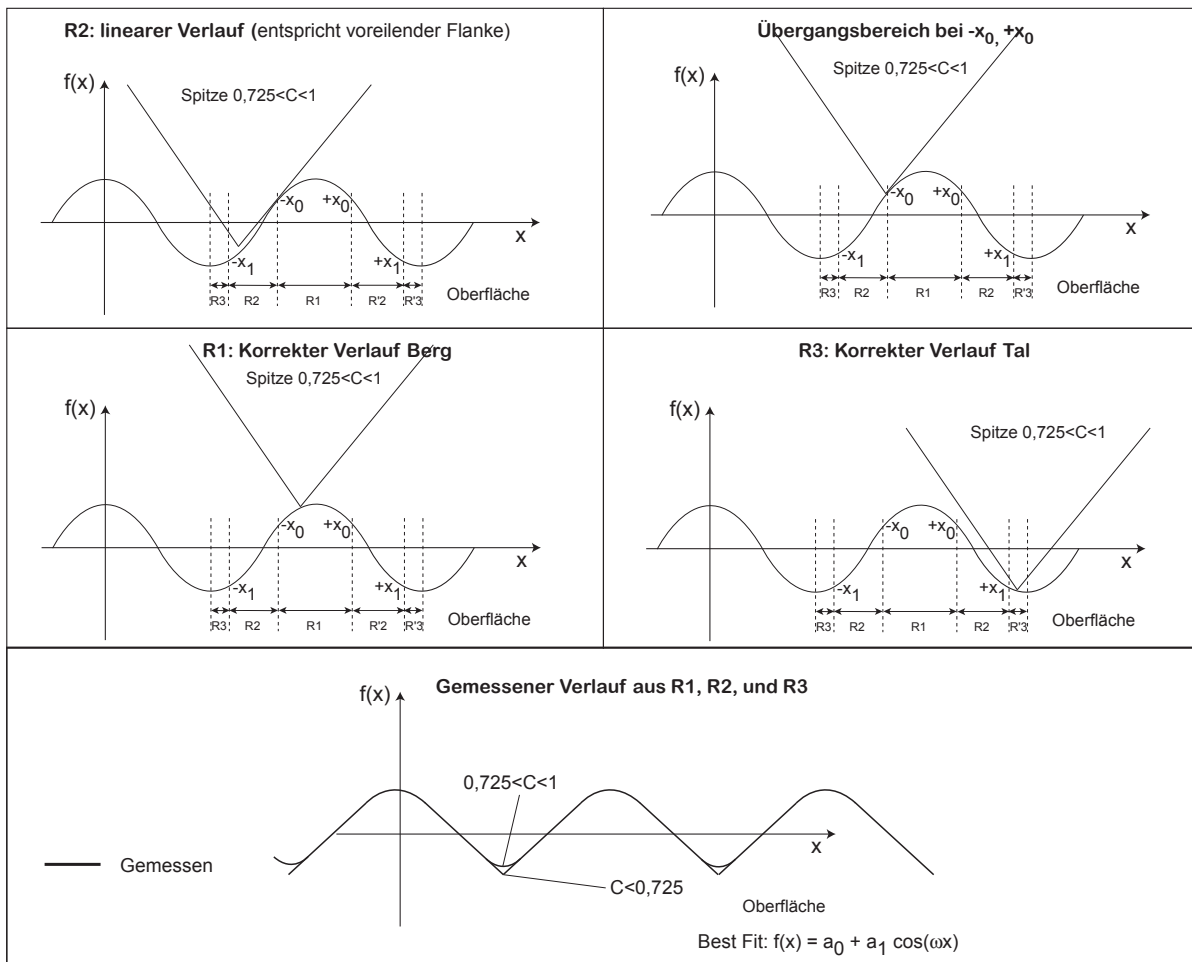


Abbildung 4.12: Der Abtastvorgang unterteilt in die Bereiche R1, R2 und R3. Im Bereich R1 kann die Spitze der Oberfläche korrekt folgen, in den Bereichen R2 und R3 wird eine von der Spitze verursachte, lineare Bewegung dem Sinus überlagert. Der Übergang findet an den Orten $-x_0$ und $+x_0$ statt.

Diese fünf Bereiche können wie folgt analytisch behandelt werden:

R_3 definiert den Bereich, in dem die Spitze der Struktur im Tal folgen kann:

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{-x_1} A \cos(\omega x) \cos(n\omega x) dx = R_3 \quad (4.12)$$

R_2 definiert den Bereich, in dem die vorauseilende Flanke der Spitze auf der Struktur aufliegt und zu einem Artefakt führt:

$$\frac{1}{T} \int_{-x_1}^{-x_0} (mx + q) \cos(n\omega x) dx = R_3 \quad (4.13)$$

R_1 definiert den Bereich, in dem die Spitze der Struktur auf dem Berg folgen kann:

$$\frac{1}{T} \int_{-x_0}^{x_0} A \cos(\omega x) \cos(n\omega x) dx = R_1 \quad (4.14)$$

R'_2 definiert den Bereich, in dem die nacheilende Flanke der Spitze auf der Struktur aufliegt und zu einem Artefakt führt:

$$\frac{1}{T} \int_{x_2}^{x_1} (-mx + q) \cos(n\omega x) dx = R'_2 \quad (4.15)$$

R'_3 definiert den Bereich, in dem die Spitze der Struktur im Tal folgen kann:

$$\frac{1}{T} \int_{x_1}^{\frac{T}{2}} A \cos(\omega x) \cos(n\omega x) dx = R'_3 \quad (4.16)$$

Durch Substitution kann gezeigt werden, dass für die voraus- und die nacheilende Flanke der Spitze $R_2 = R'_2$ und $R_3 = R'_3$ gilt. Der Ort x_0 bezeichnet den Ort des Überganges von der korrekten Abbildung zum spitzenbedingten, linearen Verlauf. Der Ort x_1 definiert den Ort des Überganges von der linearen zur korrekten Abbildung (nur für $0,725 < C < 1$ existent). Die Koeffizienten a_n ergeben sich somit für die Semi-Artefakt Phase mit $0,725 < C < 1$ zu:

$$a_n = R_1^n + 2R_2^n + 2R_3^n \quad (4.17)$$

und für den Artefakt-Phase mit $C < 0,725$ zu mit $\pm x_1 = \pm \frac{T}{2}$:

$$a_n = R_1^n + 2R_2^n \quad (4.18)$$

Der Grenzpunkte x_0 kann analytisch beschrieben werden und resultiert zu [vgl. Anhang E.7]:

$$x_0(C) = \pm \frac{\arcsin(C)}{\omega} \quad (4.19)$$

Für den Achsenabschnitt q gilt [vgl. Anhang E.12]:

$$q(C) = A \left(\sqrt{1 - C^2} + C \arcsin(C) \right) \quad (4.20)$$

Der Grenzpunkt x_1 berechnet sich zu [vgl. Anhang E.24]:

$$\cos(\omega x_1) + C\omega x_1 = \left(\sqrt{1 - C^2} + C \arcsin(C) \right) \quad (4.21)$$

Auf Grund der transzendenten Natur der Gleichung für x_1 ist nur eine numerische und keine analytische Lösung für $x_1(C)$ möglich. Die numerische Auswertung zeigt, dass eine stetige Lösung für die Fall $0,725 < C < 1$ existiert.

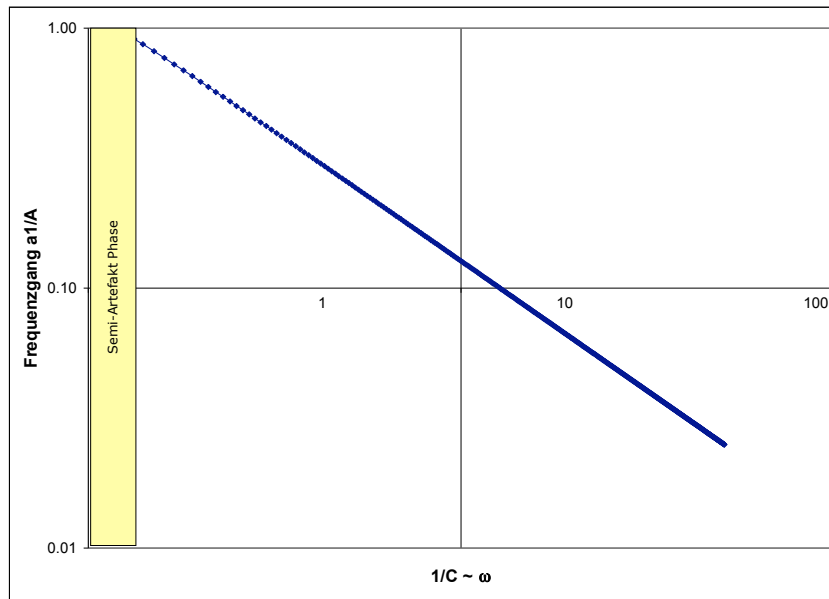


Abbildung 4.13: In der Artefakt-Phase zeigt der Frequenzgang ein Verhalten, das einem Tiefpassfilter entspricht. Der gelbe Bereich markiert den Semiartefakt-Bereich, der nicht von durch die Funktion abgedeckt wird.

4.3.3 Die Messspitze als Tiefpassfilter

Durch geschickte mathematische Ansätze wird es für die Artefakt-Phase möglich, sämtliche Integrale ausschliesslich in Abhängigkeit des Form-Faktors C zu setzen. Der Form-Faktor, mit seiner Frequenzabhängigkeit, erlaubt es wiederum, aus den Lösungen der Integrale direkt den Frequenzgang als Bodeplot darzustellen.

Für a_0 für $C < 0,725$ ergeben die Integrale:

$$a_0 = -\frac{\frac{1}{2}C(\pi^2 - \arcsin(C)^2) + C \arcsin(C)(\pi - \arcsin(C) + \sqrt{1 - C^2}(\pi - \arcsin(C)) + 2C}{\pi} \quad (4.22)$$

Für $n=1$ wird ebenfalls eine gesonderte Analyse vorgenommen. Mit a_1 für $C < 0,725$ ergeben sich die Integrale zu:

$$a_1 = \frac{2C\sqrt{1 - C^2}C + \arcsin(C)}{\pi} \quad (4.23)$$

Die detaillierte Berechnung der Integrale ist in Anhang E.30 und E.42 aufgezeigt. Die Berechnung zeigt ein Verhalten in Abhängigkeit bestimmter geometrischer Bedingungen, die wir durch den Form-Faktor $C = \frac{m}{A\omega}$ definieren, dass einem Tiefpassfilter ähnlich ist. Je flacher die Spitze im Vergleich zu Frequenz und Amplitude der Struktur ist, um so stärker ist die Dämpfung, die sie erfährt. Die Abbildung wird verbessert, wenn die Spitzenflanken steiler werden, d. h. wenn der Spitzenwinkel kleiner wird. Die Semi-Artefakt Phase belegt, dass es bestimmte geometrische Grössenverhältnisse gibt, die es erlauben, mit einer Spitze "Berge" und "Täler" von Strukturen zu sehen, aber nicht die Bereiche dazwischen. Der Bereich der Semi-Artefakt Phase betrifft Strukturelemente, mit einer Steigung die grösser ist als die der Spitze, aber kleiner als der Fall, in dem ein dritter Berührungspunkt entsteht.

Für unsere Messdaten heisst das, alle im Bild vorkommenden Strukturen mit geometrischen Bedingungen $C < 1$ können nicht mehr artefaktfrei wiedergegeben werden. Da jegliche Information über den Bereich mit höherer Frequenz und somit mit grösserer Steigung im Ortsraum fehlt, kann auch durch

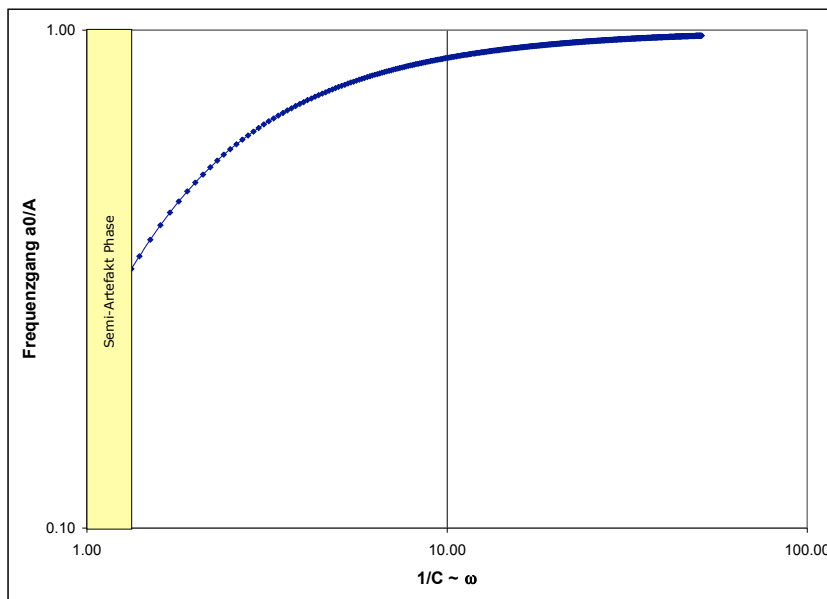


Abbildung 4.14: Mit zunehmender Stärke der Artefakte wird ein vermeintlicher DC-Offset gemessen. Es liegt nahe, dass für sehr flache Spitzen der Offset $\frac{a_0}{A}$ sich zu 1 ergibt.

Entfaltung mit der Spitzegeometrie keine zusätzliche Strukturinformation gewonnen werden. Dieser Sachverhalt ist allerdings nur gegeben, wenn die Struktur gross gegenüber der Spitze ist und somit der Spitzenradius vernachlässigbar wird. Ist die zu untersuchende Struktur klein relativ zur Spitze, wird der Spitzenradius relevant und das Modell des Oberflächenkontakts für den Abtastvorgang wird komplizierter. In diesem zweiten Fall ist eine Rekonstruktion durch Entfaltung mit der Spitzegeometrie möglich. Ein weiterer wesentlicher Punkt betrifft den Spitzenwinkel. Wird der Spitzenwinkel zunehmend kleiner, nimmt die Kraftkomponente in Abtastrichtung, bedingt durch Reibung, kontinuierlich zu und die Komponente in z-Richtung wird stetig kleiner. Beim hier verwendeten Contact-Mode AFM hat das zur Folge, dass die prinzipbedingt notwendige z-Komponente bei einer idealen Spitze gegen null geht und somit der Abtastvorgang nicht mehr durchführbar ist. Die Abtastung z. B. mit einem Nanotube ist theoretisch nur mit einem oszillierenden System, typischerweise einem Non-Contact AFM möglich. Im realen Experiment, wird eine z-Komponente durch Deformation (Verbiegung) der idealen Spitze ermöglicht.

4.4 Schlussfolgerung der theoretischen Betrachtungen

In den theoretischen Betrachtungen wird gezeigt, dass sich die Messdaten aus drei Komponenten zusammensetzen: Den Strukturdaten, den Reglerartefakten und den Artefakten bedingt durch die nicht ideale Spitzegeometrie. Durch Verringern der Abtastgeschwindigkeit reduzieren sich die Artefakte der Regeleinrichtung auf ein vernachlässigbar geringes, asymptotisches Mass. Die nicht ideale Messspitze beeinflusst die Messwerte ebenfalls. Eine theoretische Untersuchung zeigt, dass die Messspitze im verwendeten, einfachen Modell eines Kegels, ein Verhalten ähnlich einem Tiefpassfilter besitzt. Diese Eigenschaft verfälscht die Höhe und die Korrgation einer Messung frequenzabhängig.

5 Usability Study: Automatische Verschleisskontrolle der Messspitze

Im folgenden Kapitel werden die Auswirkungen häufig wiederholter Messungen diskutiert. Der zu erwartende Verschleiss einer Messspitze wird mit wenigen Parametern quantifiziert und in Zusammenhang mit dem Einfluss auf die Abbildungsqualität gesetzt.

Das RAFM besitzt drei wesentliche Eigenschaften, die für Anwendungen mit physikalischem Hintergrund von grosser Bedeutung sind. Diese wesentlichen Eigenschaften sind sowohl für Anwendungen im Forschungsumfeld, wie auch im industriellen Rahmen sehr interessant:

Programmierbarkeit:

Die einfach gehaltene Kommandosprache, die in Kapitel 2.2.3 vorgestellt wird, erlaubt die Programmierung des Geräts. Durch sequenzielles Ausführen mehrerer Kommandos können Messprozeduren definiert werden, die die automatische Akquisition und Auswertung grosser Datenmengen ermöglichen. Somit sind nicht nur einfache Abläufe wiederholbar, sondern auch komplexe Vorgänge können automatisiert werden.

Netzanbindung:

Die Möglichkeit, das Gerät an eine bestehende Netzwerkinfrastruktur anzubinden, erlaubt die ortsunabhängige Überwachung von Messprozessen und des Gerätestatus. Im weiteren erlaubt die Netzanbindung des autonom arbeitenden Geräts die dezentrale Kontrolle und das ferngesteuerte Eingreifen im Fehlerfall.

Datenreduktion:

Die Steuerungssoftware stellt zahlreiche Module zur Datenauswertung zur Verfügung, die es erlauben, innerhalb des Programms zur Gerätesteuerung komplexe Informationsanalysen vorzunehmen. Die automatisierte Datenaufbereitung erlaubt die Reduktion der gewonnenen Informationen auf einen oder mehrere charakteristische, aussagekräftige und vor allem reproduzierbare Parameter. Diese Parameter geben Aufschluss über die spezifischen Eigenschaften der zu untersuchenden Probe und fassen die Qualität der Messung in eine aussagekräftige Zahl.

5.1 Probleme und Phänomene häufig wiederholter Messungen

Ein leicht zu automatisierender Ablauf ist die sequenzielle Messung von sehr vielen Einzelbildern auf der selben oder auf verschiedenen Proben. Ein solcher Messprozess kann, wird er über sehr lange Zeit durchgeführt, Aufschluss über den Drift des Gerätes liefern und kann zur Charakterisierung des Mikroskops verwendet werden. Eine weit interessantere Anwendung findet diese Art der Automatisierung im industriellen Umfeld. Viele Abläufe der Qualitätskontrolle von Oberflächen oder Strukturgrössen unterschiedlicher Proben wie zum Beispiel Wafer in der Mikrochip Herstellung, benötigen eine einfache, autonom laufende Einrichtung, um auch grosse Stückzahlen auf Ihre Qualität hin zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist aber zu berücksichtigen, dass die Qualität der zu untersuchenden Proben nicht nur durch die Oberfläche selbst definiert wird, sondern auch durch die Eigenschaften und die Genauigkeit des Messgerätes.

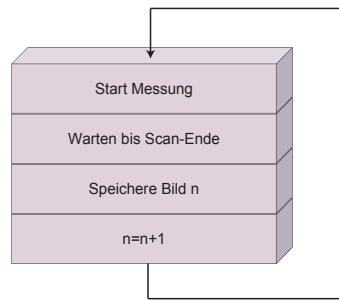


Abbildung 5.1: Der Programm-Ablauf des Langzeit-Experiments.

5.2 Ermittlung der Spitzenqualität bei Verwendung einer Referenzstruktur

Anlehnend an Abbildung 4.4 und die in Kapitel 4.2 erarbeiteten Resultate zur Reduktion des Einflusses des Reglers, wird in diesem Experiment eine wohl definierte Struktur verwendet, um den Spitzeneinfluss zu quantisieren. Die Spitze wurde in diesem Verfahren in regelmässigen Abständen an der Referenzstruktur TGZ03 aus Kapitel 4 mit optimierten Messparametern abgebildet. Die Kontaktkraft betrug 10nN die Abtastzeit 2.5 Sekunden pro Linie und der Scanbereich $10\mu\text{m}$. Daraus folgt eine Abtastgeschwindigkeit von $4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. In Kombination mit den Regelparameter $K_P = 17$ und $K_I = 0$ darf der Einfluss des Reglers entsprechend den theoretischen Betrachtungen aus Kapitel 4.2 vernachlässigt werden. Die Struktur des TGZ03 darf als konstante Grösse angenommen werden, da sie nur jeweils zur Referenzmessung im Kontakt mit der Messspitze steht und somit nahezu keinem Verschleiss unterliegt. Positionierungsgenauigkeiten werden ebenfalls als vernachlässigbar angenommen, da die Struktur des TGZ03 eine maximale Fertigungstoleranz von 1 Prozent aufweist und eine hohe strukture geometrische Homogenität aufweist. Bedingt durch diese Massnahmen wird davon ausgegangen, dass die Messung der nahezu idealen Stufenstruktur ein optimales Abbild der Spitze darstellt.

Zwischen zwei Messungen auf der Referenzstruktur wurde auf einer sehr harten AlO_2 -Sinterkeramik während mehrerer, wiederholter Messungen der Spitzenabrieb forciert. In diesem Experiment wurden 140 Bilder mit einer Kontaktkraft von 40nN abgetastet. Die Abtastzeit lag bei 0,3 Sekunden pro abgetasteter Linie und der Scanbereich $10\mu\text{m}$. Die Abtastgeschwindigkeit errechnet sich so zu $3.33 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die gesinterte Aluminiumoxid - Keramik wird in grossen Stückzahlen als Membran von Vakuumsensoren von der Firma Inficon produziert. Durch das stark abrasive Verhalten ist diese Probe gut geeignet für das Experiment.

Der Ablauf des Experiments ist weitgehend automatisiert und gestattet eine sehr grosse Anzahl von Wiederholungen. Der Messzyklus, bestehend aus 140 Messungen auf der Keramik und einem anschliessenden Abbilden auf der Referenzstruktur, wurde insgesamt 15 mal wiederholt. Der experimentelle Ablauf entspricht dem Flussplan in Abbildung 5.2: Abbildung 5.3 zeigt, wie sich die Messung der nahezu idealen Stufe mit kontinuierlicher Benutzungszeit der Spitze verändert. Im Bild ist eine Veränderung der Steigung der Flanken um etwa 3 - 3.5 Winkelgrad zu erkennen. Der Winkel einer neuen Spitze ist laut Herstellerangaben mit $\alpha = 25^\circ \pm 5^\circ$ spezifiziert. In der Abbildung sind drei ausgesuchte Cross-Sections der Referenzstruktur überlagert. Der blaue Verlauf entspricht einem Querschnitt der Referenzstruktur, abgebildet mit einer neuen Spitze. Der gelbe Querschnitt entspricht der Abbildung der Referenz nach 700 Wiederholungen, der rote Verlauf der nach 1280 Messungen auf der Keramik. Jeweils nach 140 Messungen erfolgte eine Abbildung der Referenzstruktur. Der errechnete Winkel aus dem blauen Verlauf von $\alpha = \alpha_{0S} + \alpha_{0F} = 14.68^\circ + 10.75^\circ = 25.43^\circ$ deckt sich gut mit den Herstellerangaben von $25^\circ \pm 5^\circ$. Der Spitzenwinkel reduziert sich im Laufe der Experiments zu: $\alpha = \alpha_{1400S} + \alpha_{1400F} = 17.23^\circ + 14.05^\circ = 31.28^\circ$.

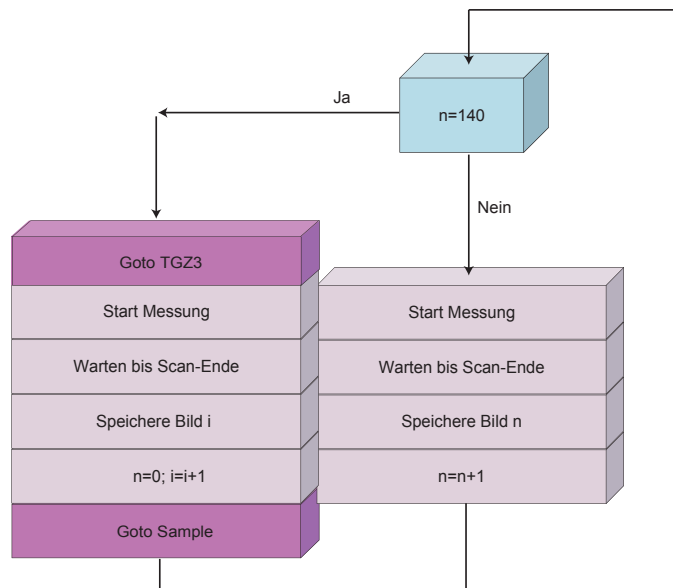


Abbildung 5.2: Der Programm-Ablauf des Langzeit-Experiments als Flussdiagramm dargestellt. Jeweils nach 140 Messungen auf einer harten sinterkeramischen Oberfläche wird die Spitze auf einer Stufenstruktur abgebildet.

Der dabei anfallende theoretische Materialabtrag der Spitze entspricht einem Volumen von $3.546 \cdot 10^{-21} m^3$ und einer entsprechenden Masse von $8.262 \cdot 10^{-19} g$. Daraus resultiert ein Abrieb von $5.901 \cdot 10^{-22} g$ pro abgetastetem Bild und $2.305 \cdot 10^{-24} g$ pro Scanlinie bei einer Auflösung von 256 Zeilen a $10 \mu m$. Pro Scanzeile entspricht das einem Volumenverlust von $1.65 \cdot 10^{-25}$ mol Silizium Atomen. In Abbildung [5.4] sind zwei Aufsichten der Abbildung des TGZ03 dargestellt. Man erkennt einen leichten Einfluss der verringerten Abbildungsleistung entsprechend der Theorie aus Kapitel 4, bedingt durch die geringere Steilheit der Spitzenflanken. Werden die Steigungen der jeweiligen Abbildung der Referenzstruktur miteinander verglichen, zeigt sich ein Verlauf wie in [5.5]. Der Graph zeigt einen erkennbaren Trend zu stumpferen Winkeln hin.

Die Spitzenqualität kann mit relativ geringem Aufwand automatisch mit Hilfe einer Schwellwertdetektion ermittelt werden. Unterschreitet z. B. der Spitzenwinkel einen Wert, der 3° kleiner ist als der Startwinkel, so kann ein Messunterbruch eingeleitet und ein Operator verständigt werden. Allerdings sind einige Punkte zu berücksichtigen, die wesentlichen Einfluss auf den Spitzenverschleiss haben:

1. In dem gemachten Experiment wurde zum raschen Verschleiss der Spitze mit einer verhältnismässig grossen Anpresskraft von $40nN$ gearbeitet. In der Praxis sind Kräfte in dieser Grössenordnung nicht üblich, da sie keine wesentliche Verbesserung der Abbildung liefern. Da der Abrieb von der Druckkraft abhängig ist, ist es anzunehmen, dass bei geringerer Spitzenlast weniger Verschleiss auftritt und somit die Bestimmung einer Winkeländerung sehr aufwendig wird.
2. Der Verschleiss der Spitze ist abhängig von den Materialeigenschaften der zu untersuchenden Oberfläche. Weist die Oberfläche eine geringere Härte auf, als die in diesem Experiment verwendete, reduziert sich der Einfluss durch Abrieb und eine automatische Erkennung des Spitzenwinkels wird stark erschwert. Ist die Härte der zu messenden Oberfläche sogar deutlich geringer, wird im wesentlichen nur die Oberfläche selbst modifiziert.
3. Zeigt die Oberfläche stark adhäsives Verhalten, werden vermehrt Partikel der zu messenden Struktur an der Spitze haften und deren Geometrie verändern. Dieser Effekt kann zeitweise eine Reduktion des Spitzenwinkels verursachen.

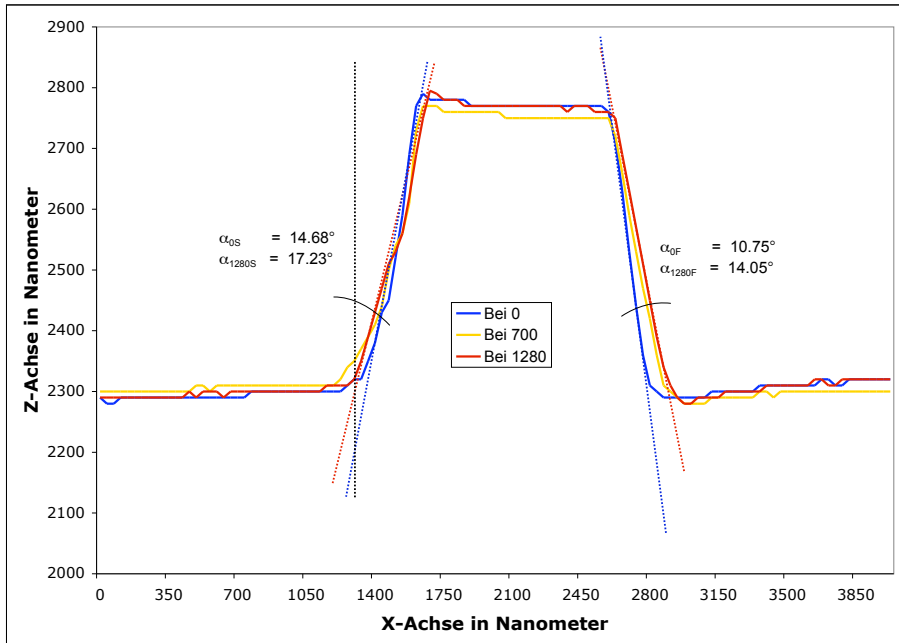


Abbildung 5.3: In der Darstellung sind drei ausgesuchte Cross-Sections der wiederholten Messung der Referenzstruktur überlagert. Der blaue Verlauf entspricht einem Querschnitt der Referenzstruktur, bevor Bilder einer gesinterten reinen Aluminiumoxid Keramik abgetastet wurden. Der gelbe Querschnitt entspricht der Abbildung der Referenz nach 700 Wiederholungen, der rote Verlauf der nach 1280 Messungen auf der Keramik. Jeweils nach 140 Messungen erfolgte eine Abbildung der Referenzstruktur.

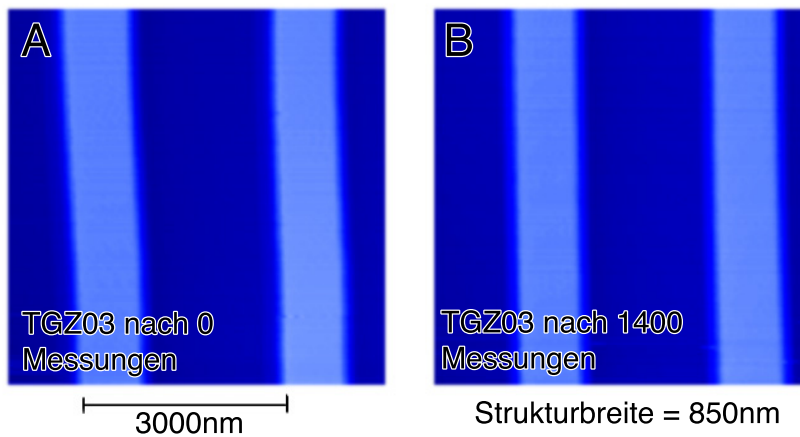


Abbildung 5.4: Die Aufsicht auf zwei Abbildungen der Referenzstruktur. Zwischen den beiden Abbildungen wurden 1400 Messungen durchgeführt. Das Bild links zeigt eine geringe Reduktion der Abbildungsleistung, erkennbar an den etwas breiteren und ausgewascheneren Flanken.

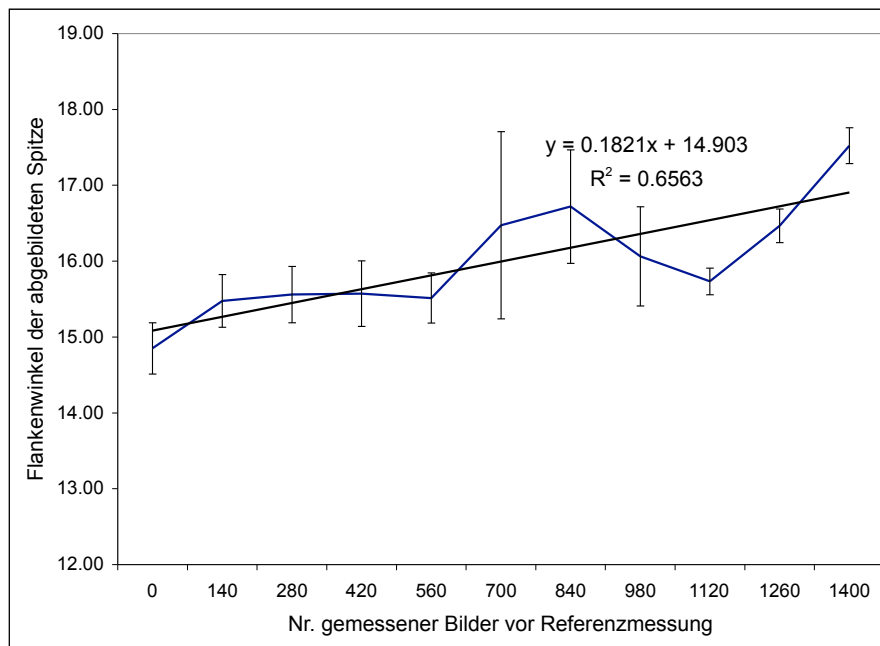


Abbildung 5.5: Der Verlauf des Spitzenwinkels abgebildet an der als ideal anzunehmenden Stufe. Die dargestellte Spitze wurde insgesamt für 1400 Messungen verwendet. Der Graph zeigt einen erkennbaren Trend zu stumpferen Winkeln hin. Jeder Messpunkt wurde aus 10 Messungen gemittelt.

5.3 Ermittlung der Spitzenqualität ohne Referenzstruktur

In einem weiteren Experiment wurde versucht, die Abnutzung der Spitze ohne eine Referenzstruktur, direkt aus den gemessenen Bildern selbst zu bestimmen. Die keramische Probe besitzt eine grosse Härte und eignet sich dadurch ideal, um den Spitzenverschleiss zu forcieren. Das Programm zur automatischen, wiederholten Messung der Oberfläche ist sehr einfach gehalten [Abb.5.1] und wiederholt im Wesentlichen am selben Ort mehrfach eine Messung.

Die Bilddaten wurden in einem automatischen Ablauf mit dem ersten Bild der Messserie verglichen und auf Unterschiede untersucht. Um eine Aussage über Veränderungen im Bild machen zu können, müssen die zu vergleichenden Bilder deckungsgleich übereinander gelegt werden. Diese Aufgabe kann mittels geeigneter Bildverarbeitungs-Algorithmen automatisiert werden. Im hier gezeigten Ansatz wird die Kreuz-Korrelation [Formel 5.1] verwendet, um dieses Problem der Verschiebung in X- und Y-Richtung von Bild₁ zu Bild_n zu lösen.

Die Kreuz-Korrelation entspricht einer Faltung der beiden zu vergleichenden Bilder im Ortsraum, und kann somit im Frequenzraum als Multiplikation wie in 5.4 berechnet werden. Die Kreuz-Korrelation ist im eindimensionalen Fall gegeben mit:

$$C_{fg}(x) = f(x) * g(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f^*(u)g(u+x)du \quad (5.1)$$

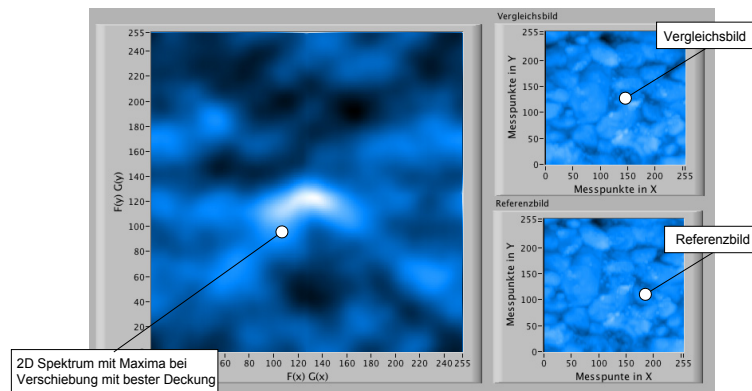


Abbildung 5.6: Im rechten Teil des Screenshots wird die Referenzmessung und das zu vergleichende Bild n dargestellt. Der linke Fensterteil zeigt das Spektrum der Multiplikation der beiden fouriertransformierten Bilder. Das Maxima des Bildes zeigt die notwendige Verschiebung, um die beste Deckungsgleichheit zu erreichen.

Für diskrete Signale folgt:

$$C_{fg}(x) = f(x) * g(x) = \sum_{u=0}^{N-1} f(u)g(u+x) \quad (5.2)$$

Entsprechend für den zweidimensionalen Fall:

$$C_{fg}(x, y) = f(x, y) * g(x, y) = \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} f(u, v+y)g(u+x, v) \quad (5.3)$$

Oder sehr viel einfacher im Fourier-Raum:

$$f(x, y) * g(x, y) = F(u, v)G(u, v) \quad (5.4)$$

Für die Transformation wird im hier gezeigten Ansatz folgender Ausdruck für die Transformation in den Frequenzraum verwendet:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n)e^{-2\pi i(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{M})} \quad (5.5)$$

und entsprechend für die Rücktransformation:

$$f(m, n) = \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v)e^{-2\pi i(\frac{mu}{M} + \frac{nv}{M})} \quad (5.6)$$

Als Ergebnis der Multiplikation der beiden Bilder im Fourier-Raum, zeigt sich ein zweidimensionales Spektrum mit einem deutlichen Helligkeitsanstieg im Bild, dessen Position, die Verschiebung in X- und Y-Richtung [vgl. Abbildung 5.6] anzeigt. Auf den Ortsraum übertragen bewirkt die kontinuierliche Verschiebung ein Maxima der in 5.3 berechnete Summe. Dies ist der Fall bei einer möglichst guten Deckung der beiden zu vergleichenden Bilder. Mit dem ermittelten Verschiebungsvektor können die Bilder deckungsgleich ausgerichtet und verglichen werden. Um die Veränderung der Abbildungsqualität genauer zu beobachten, war es notwendig, das in Kapitel 4 eingeführte Mass der Kantensteilheit zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird das Bild mit dem Ansatz 5.7 abgeleitet, um für jeden Bildpunkt den

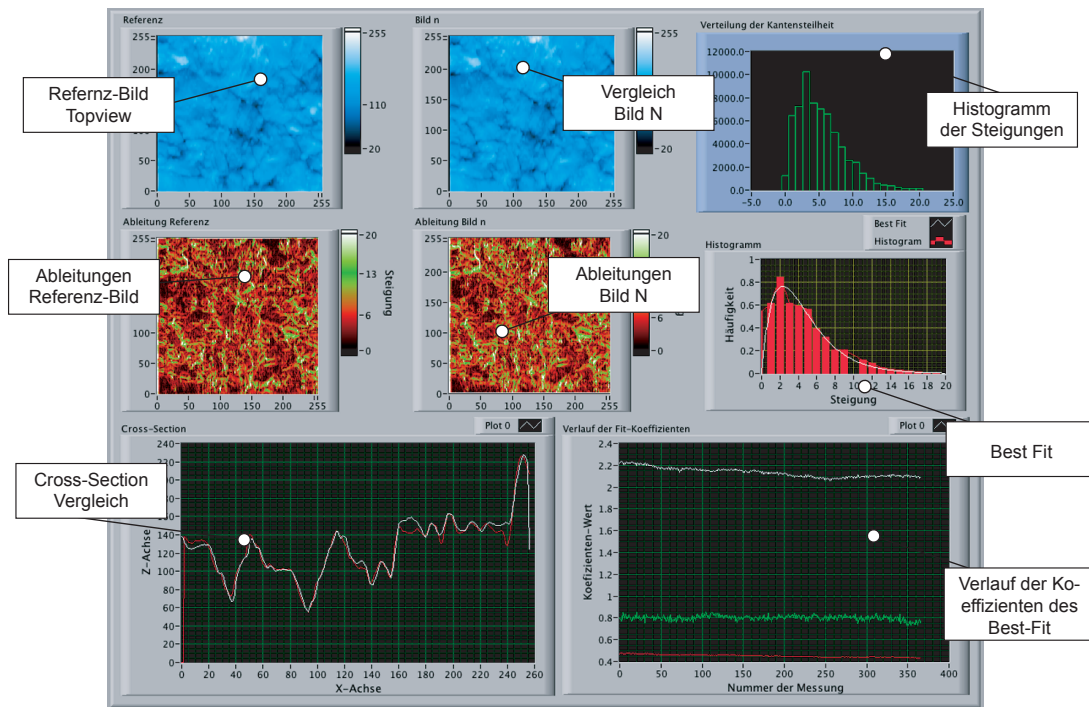


Abbildung 5.7: Dieser Screenshot zeigt das Graphical User Interface der Analysesoftware zur Untersuchung der Strukturänderung im Bild. Die Software leitet sequenziell alle Bilder einer Messserie ab, bildet ein Histogramm der im Bild vorkommenden Steilheiten und stellt die Koeffizienten einer gefitteten, Polynominalfunktion als zeitlichen Verlauf dar.

Gradienten zu erhalten.

$$f'(x, y) = \sqrt{(f(x, y + dy) - f(x, y))^2 + (f(x + dx, y) - f(x, y))^2} \quad (5.7)$$

Die resultierende Matrix mit den $(i - 1)x, (y - 1)$ abgeleiteten Bildpunkten widerspiegelt die örtliche Verteilung der im Bild vorkommenden Steigungen. Um eine zeitliche Veränderung der Steigungen im Bild zu untersuchen, wurden statistische Hilfsmittel verwendet. In einem ersten Schritt wurde das Histogramm der Ableitungen berechnet und so die Verteilung der Steigungen ausgewertet [5.7]. Man kann davon ausgehen, dass eine sich verändernde Spitzengeometrie sich dadurch äussert, dass die Steigungsverteilung im Bild sich verändert. Um diese Veränderung tendenziell zu beobachten, wurde das Histogramm mit einer geeigneten Funktion gefittet. Die Poisson-Verteilung mit der Form 5.8 erwies sich für die Aluminium-Oxid Probe als ideal.

$$f(x) = A(bx)^n \cdot e^{-(bx)} \quad (5.8)$$

Die Koeffizienten wurden als relevante Parameter, abhängig von der gemessenen Bildnummer, als Verlauf dargestellt. Parameter A skaliert die Höhe der Verteilungsfunktion, b die Breite. Der Trend der Parameter ist in Darstellung 5.8, der Verlauf der Fit-Funktion in Abbildung 5.9 gezeigt. Man erkennt, dass die Verteilung mit zunehmender Bildnummer flacher und im mittleren Steigungsbereich gering bauchiger wird, das heisst eine leichte Umverteilung der Steigungen zu beobachten ist. Der Verlauf der Parameter deckt sich gut mit dem Resultat des Versuches mit einer als konstant anzunehmenden Referenzstruktur. Trotz der relativ starken Veränderung des Spitzenwinkels von einigen Winkel-Grad, bleibt die Abbildung einer realen Oberfläche nahezu unverändert [vgl. Abb. 5.10].

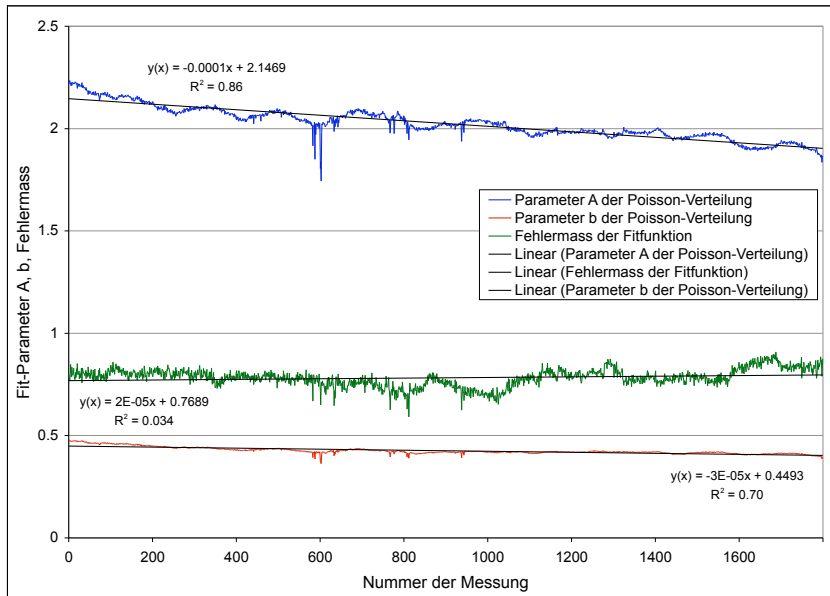


Abbildung 5.8: Der Graph zeigt den Verlauf der Koeffizienten der Poisson-Verteilung die aus dem best-fit des Histogramms der Steilheiten im abgeleiteten Bild resultieren. Die Ausreisser im Bereich um Messung 575 und 600 sind die Folge von Erschütterungen im Gebäude, die einzelne Abtastlinien verfälschen. Der blaue Verlauf zeigt den Faktor A der Verteilung 5.8, der rote Verlauf den Parameter b und der grüne Verlauf die um Faktor 200 vergrößerte Varianz der Fit-Funktion.

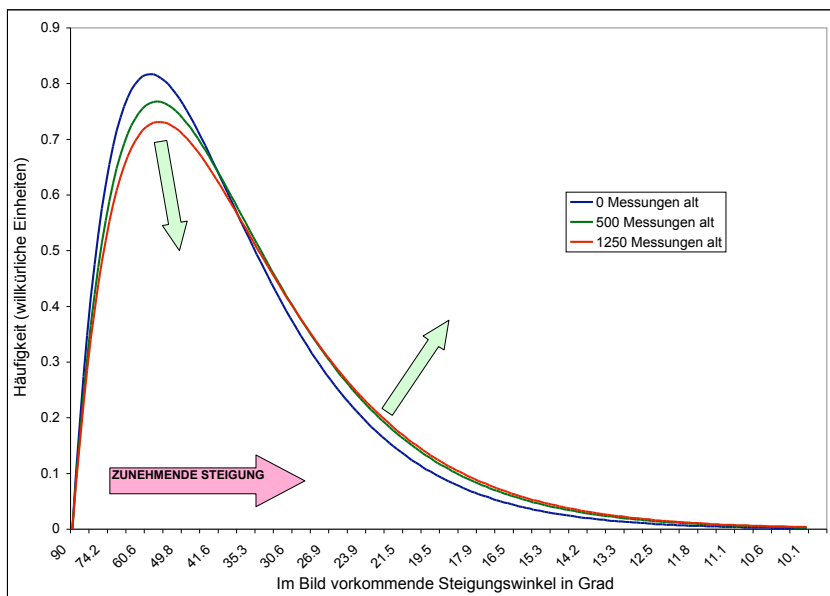


Abbildung 5.9: In dieser Darstellung sind die Verläufe des Best-Fit abhängig von der Nummer der bereits aufgenommenen Messungen gezeigt. Der Verlauf zeigt eine Umlagerung zu mittleren Steigungen hin.

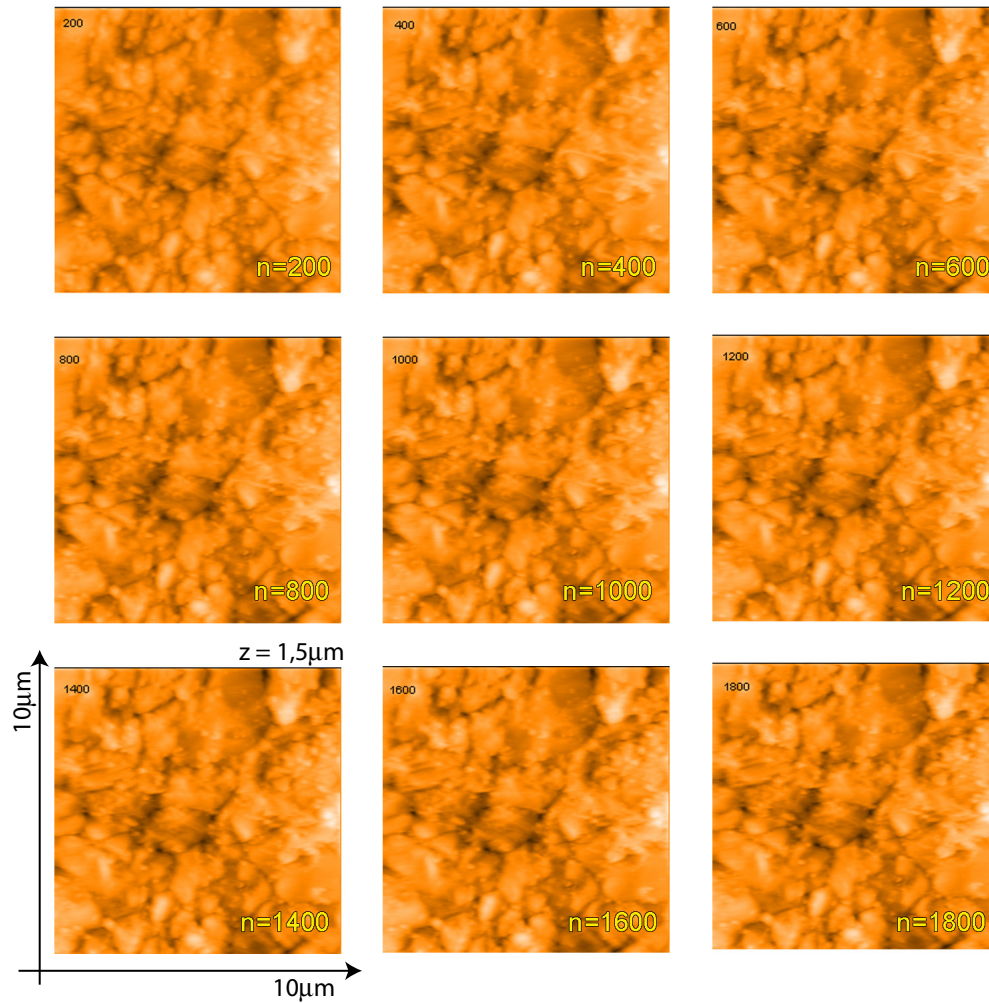


Abbildung 5.10: Ausgewählte Bilder aus der Langzeitmessung mit insgesamt 2450 Scans. Die Bilder wurden im Contact-Mode mit einem Setpoint von 10 nN und optimierter Reglereinstellung durchgeführt. Drift und Bildqualität sind bemerkenswert stabil. Eine Bildveränderung ist mit bloßem Auge nicht erkennbar.

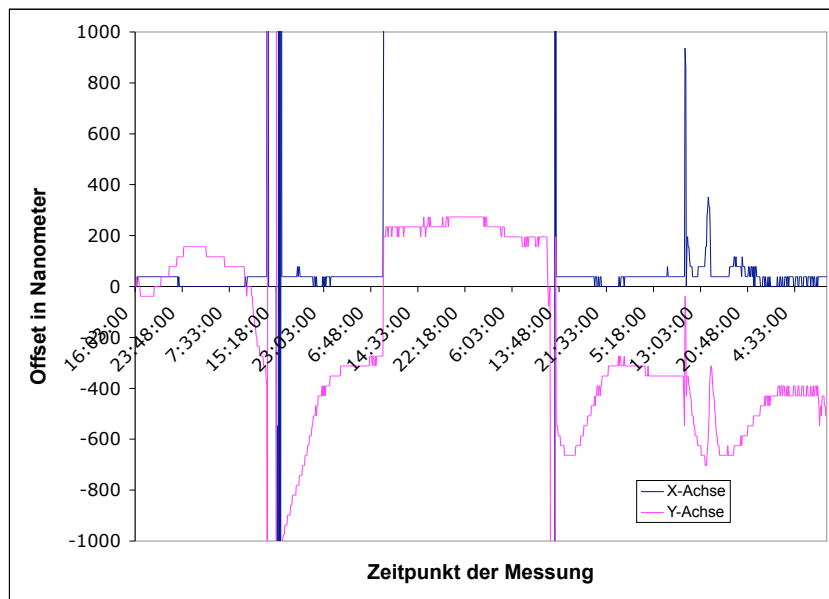


Abbildung 5.11: Die wiederholte Messung am selben Ort der gesinterten Keramikprobe zeigt ohne Lichtschutzhäube einen deutlichen Drift, teilweise sogar einen Verlust des Kontaktes mit der Oberfläche, erkennbar an den Werten, die sehr viel grösser oder kleiner sind als der Skalenbereich des Offsets. Auffallend ist die Korrelation zu den Tageszeiten mit einer deutlichen Veränderung der Menge einfallenden Lichtes. Die gestufte Form der Kennlinie entsteht durch die diskrete Anzahl Bildpunkte, die dem Abtastvorgang zugrunde liegt. Im dargestellten Zeitraum wurden 1200 Messungen durchgeführt.

5.3.1 Einfluss von Fremdlicht

Die Auswertung der Messreihen zeigte eine erstaunliche Langzeitstabilität des Systems. Die Bildqualität bleibt, wie in Abb. 5.10 zu erkennen ist, von blossen Auge betrachtet während der gesamten Messzeit nahezu unverändert. In einem ersten Versuch wurde allerdings festgestellt, dass die Messungen einem beträchtlichen Drift in x- und y-Richtung unterliegen. Grund für diesen Drift ist der Fremdlichteinfluss des Tageslichts. Ohne entsprechenden Lichtschutz zeigt sich eine gute Korrelation des Drifts mit den Tageszeiten, die auf der x-Achse aufgetragen sind. Bei sehr ungünstigen Fremdlichteinwirkungen kann der Störeinfluss sogar zu einem Messunterbruch führen, zu erkennen an den Polstellen im Graph. Deutlich bessere Resultate sind mit einem Lichtschutz zu erreichen. In Bild 5.12 erkennt man den deutlich geringeren Drift des Gerätes von etwa 100nm in x- und y-Richtung bei einer Wiederholung von 2000 Messungen. Diese sehr guten Resultate wurden mit einfachen, geeigneten Massnahmen zur Reduzierung des Fremdlichteinfalltes erreicht.

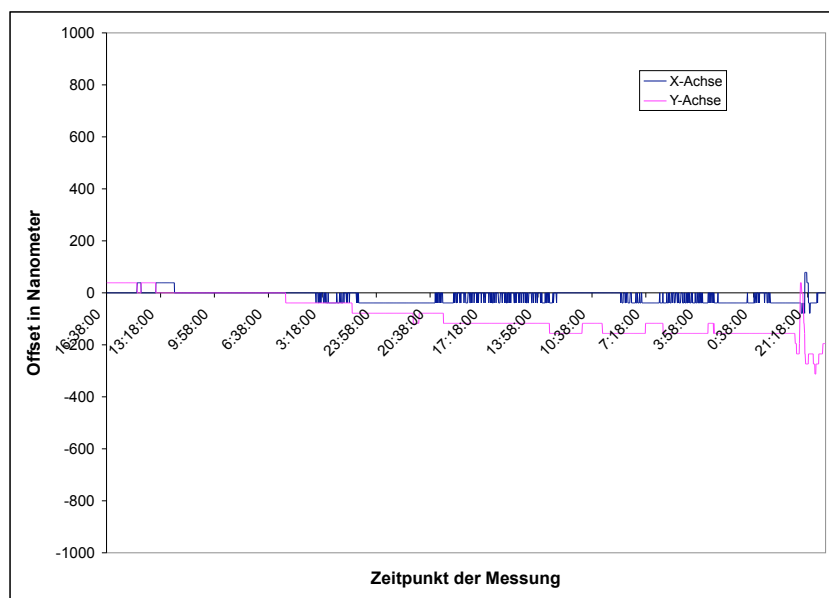


Abbildung 5.12: Die Messapparatur weist mit Lichtschutzhaube einen deutlich kleineren Drift auf, der auch nicht mit der Tageszeit korreliert, sondern eher linear zunimmt. Die gestufte Form der Kennlinie entsteht durch die diskrete Anzahl Bildpunkte, die dem Abtastvorgang zugrunde liegt. In der verstrichenen Zeit wurden 2000 Messungen durchgeführt.

5.4 Schlussfolgerung der Studie "Automation"

Die unterschiedlichen Experimente zeigten, dass das RAFM und das verwendete Messprinzip für den Einsatz im industriellen Langzeitbetrieb sehr gut geeignet ist. Vor allem die nahezu unbeschränkte Flexibilität des System durch die Möglichkeit der Programmierung ist ein sehr grosses Vorteil gegenüber anderen Systemen.

In den Langzeitexperimenten mit unterschiedlichen Messserien von bis zu 2500 Bildern mit der selben Spitze hat sich gezeigt, dass der Einfluss der Spitzenabnutzung auf das Bild sehr gering ausfällt. Diese Erkenntnis ist erstaunlich, da bei einer Wiederholungsrate von 2500 Bildern und einem Messbereich von $10\ \mu\text{m}$ mit einer wenige Mikrometer grossen Spitze eine Wegstrecke von 12.8 Meter zurückgelegt wird. Der Spitzenverschleiss ist bei sehr harten Proben, normalen Spitzenlasten von 10nN und sehr häufigen Wiederholungen mit einem Betrag von einigen Winkelgrad gut messbar. Der Spitzenwinkel veränderte sich in sehr langen Messreihen von bis zu 2500 Bildern um Werte von $\alpha_{neu} = 25.43^\circ$ zu $\alpha_{alt} = 31.28^\circ$. Diese Veränderung von rund 6 Winkelgrad ist sowohl durch Messungen auf Referenzstrukturen, als auch durch die Auswertung der eigentlichen Bildserie detektierbar. Der Einfluss auf die Qualität der Messungen ist allerdings sehr gering und kann für die meisten Anwendungen vernachlässigt werden. Schlussfolgernd kann man sagen, dass für harte Proben und relative grosse Anpresskräfte eine qualitative Aussage möglich ist, die es uns erlaubt, die Abbildungsleistung der Spitze zu quantifizieren und deren Verschleiss zu erkennen. Für Fälle in denen mit geringerer Kraft oder auf Oberflächen mit weniger Härte gemessen wird, sind geringe Verschleisserscheinungen zu erwarten, die auf Grund der geringen Wirkung nur sehr schwer zu detektieren sind.

In den Untersuchungen über die Verfälschung der Messdaten hat sich gezeigt, dass die Messungen durch drei wesentliche Komponenten definiert werden. Durch die Struktur selbst und durch das Mikroskop, bestehend aus Regeleinrichtung und Messspitze. Der Regler hat bei ungünstig gewählten Parametern einen starken Einfluss auf die Abbildungsqualität. Vor allem bei schnellen Messungen mit grossen Strukturtiefen sind die Regeleinflüsse beträchtlich. Wird die Verstärkung des P-Teiles genügend klein gewählt, der Integralteil nicht zu stark betont und eine relativ langsame Abtastgeschwindigkeit gewählt, kann der Reglereinfluss stark eingeschränkt werden.

In den unterschiedlichen Langzeitexperimenten hat sich gezeigt, dass das Remote Atomic Force Microscope über längere Zeit ohne Eingriff eines Operators eingesetzt werden kann und selbst bei grossen Messwiederholungen eine sehr gute Abbildungsqualität möglich ist. Dies sind die wesentlichen Aspekte für den erfolgreichen Einsatz eines Raster Kraft Mikroskops im industriellen Einsatz wie zum Beispiel in der Qualitätskontrolle.

6 Usability Study: Erzeugung sehr grosser Bilder

Ein AFM ist systembedingt für relativ kleine Messbereiche konzipiert. Bei dem von uns verwendeten easyscan AFM sind zwei Messköpfe erhältlich, einer mit $100\mu\text{m}$ Messbereich und ein besser auflösender mit $10\mu\text{m}$ maximal abtastbarer Fläche. Möchte man den Messbereich vergrössern, ist typischerweise der Wechsel auf ein Messgerät mit geringerer Auflösung notwendig, ein Elektronen-Mikroskop oder gar ein klassisches Lichtmikroskop. Dieser Nachteil der Kompromissfindung zwischen hoher Auflösung und grossem Abtastbereich, kann durch die Kombination zweier Aktuatoren mit unterschiedlichen sich überlagernden Längenskalen gelöst werden. Werden mit so einer Apparatur mehrere sich teilweise überlagernde Bilder generiert, können diese zu einem grösseren Gesamtbild zusammengesetzt werden. Der Aktuator mit der geringeren Längenskala ist dabei für die maximale Auflösung des Gerätes verantwortlich und der Aktuator mit dem grossen Fahrbereich für die maximal abbildbare Fläche. Das RAFM kombiniert genau diese beiden Aktuatoren. Die vorhandene Vierachsen-Robotik gestattet die Verschiebung in X- und Y-Richtung mit einer Präzision von deutlich weniger als $2\mu\text{m}$ und das bis zu einem Stellbereich von 14mm , der Messkopf selbst ist geeignet für die Abtastung der einzelnen hoch aufgelösten Bilder.

6.1 Das Mosaikprinzip

Das Abbildung von grossen Objekten, die den darstellbaren Bereich des Aufnahmegerätes überschreiten ist ein bekanntes Problem. Vor allem in der Aviatik und der Raumfahrt wird das Mosaikverfahren eingesetzt, um zum Beispiel grosse Landstriche mit hoch aufgelösten Satellitenbildern durch geeignetes Zusammensetzen der Einzelaufnahmen bildlich und zusammenhängend darzustellen. Ein ähnliches Verfahren kann mit dem RAFM im mikroskopischen Bereich ebenfalls durchgeführt werden. Durch ein einfaches Skript-Programm kann mit der Robotik die Messspitze sequenziell über einen grossflächigen Bereich der zu untersuchenden Probe bewegt werden.

Bild 6.1 zeigt den verwendeten Programmablauf für die Aufnahme der Bildserie. Zwischen zwei Bildern wird die eine Achse der Robotik um eine Strecke in X-Richtung verschoben, die etwa 10 Prozent kleiner ist als der Messbereich des AFM-Messkopfes. Ist eine ganze Reihe von Messungen beendet, wird in Y-Richtung um den selben Wert verschoben und eine weitere Reihe gemessen. Die Bilder des programmierten Ablaufs liegen als Rohdaten vor und müssen für eine grossflächige Darstellung aneinander gesetzt werden. Diese Aufgabe wird durch einige Gegebenheiten stark vereinfacht. Beim Abtasten wird die aktuelle Position des x-, y-Tisches mit aufgezeichnet. Makroskopisch ist die Position jedes Bildes durch die Koordinaten bekannt. Diese Koordinaten können für das Zusammensetzen der Bilder genutzt werden. Im Weiteren wird das Zusammensetzen der Einzelbilder durch die Tatsache der perspektivenlosen Abbildung stark vereinfacht. Werden zum Beispiel einzelne fotografische Bilder zu einem Panoramabild kombiniert, muss nebst dem eigentlichen Zusammensetzen der Einzelteile auch der perspektivischen Verzerrung Rechnung getragen werden. Dazu kommen alle Fehler, die durch die Aufnahmelinse entstehen. Bei der Abtastung einer Oberfläche mit einem AFM entstehen keine perspektivischen Fehler, da sich der Sensor in der Objektebene selbst befindet. Die Aufgabe der Kombination der einzelnen Bilder reduziert sich demzufolge auf die reine Bildkantenanpassung.

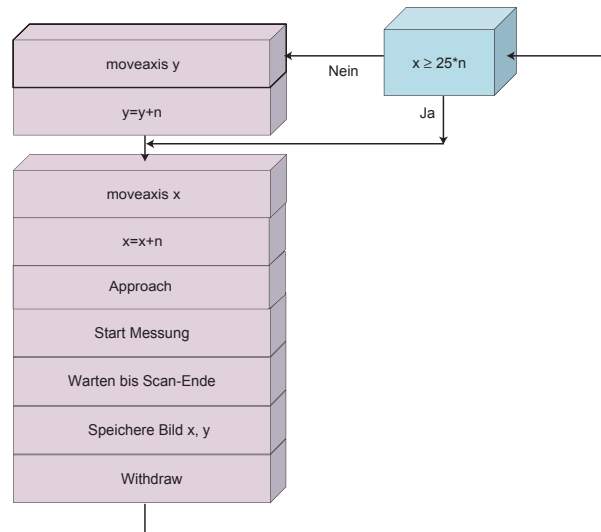


Abbildung 6.1: Ablaufsteuerung des Programms zur Akquisition von grossflächigen Bildern mit hoher Auflösung. Im hier gezeigten Beispiel werden 25*25 Bilder aufgenommen.

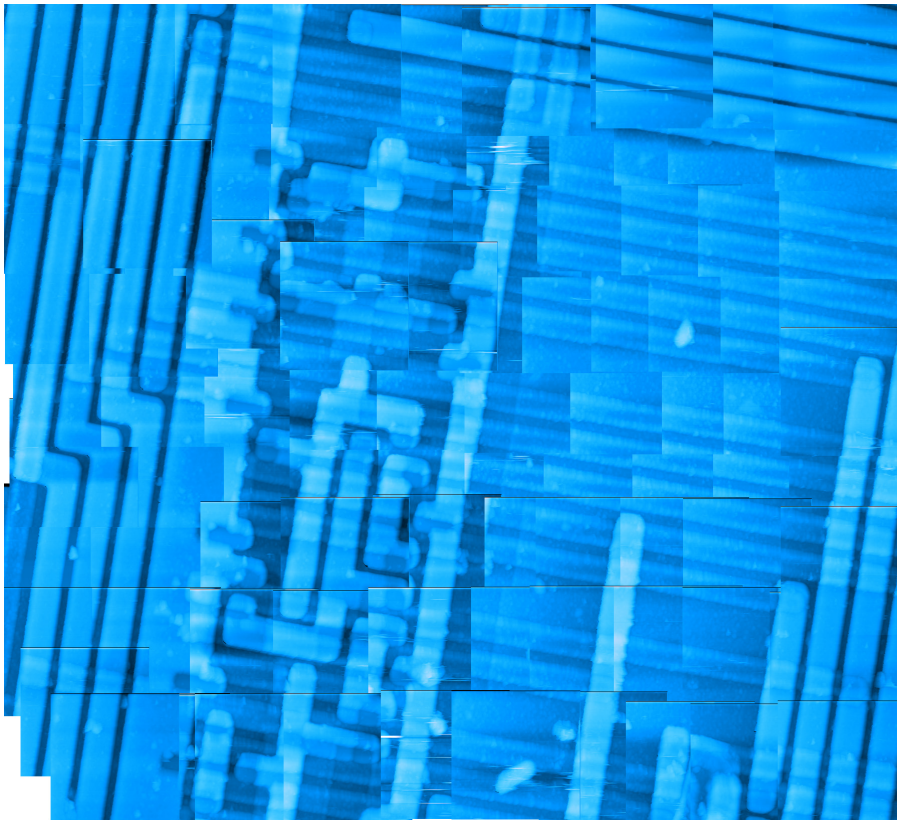


Abbildung 6.2: Eine 2400x2400 Bildpunkte grosse Aufnahme einer Oberfläche eines Mikrochip. Die Abbildung deckt einen Bereich von $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ ab. Das Bild zeigt Rohdaten, die im Offset nicht manipuliert wurden!

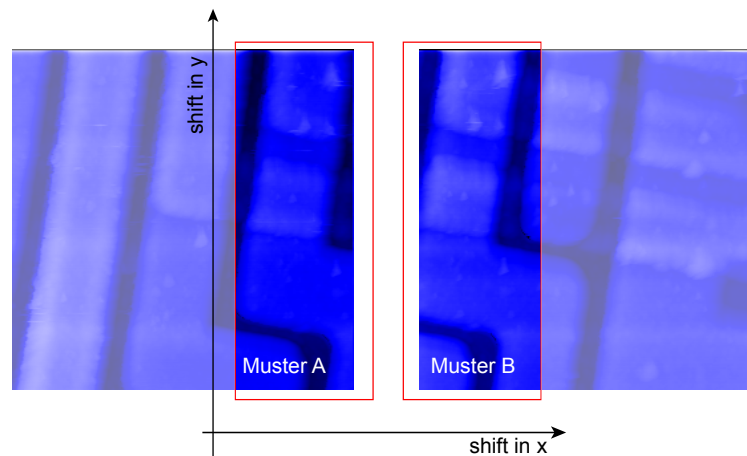


Abbildung 6.3: Um zwei benachbarte Bilder aneinander zu passen, werden die Randbereiche mittels Kreuz-Korrelation auf beste Deckung untersucht. Ein allfälliger z-Offset Unterschied - im Bild durch die hellen Bereiche in Muster B zu erkennen - kann durch Hinzufügen oder Subtrahieren von Höhenwerten reduziert werden.

6.2 Bildkantenanpassung

Bei der Bildkantenanpassung geht es darum, einzelne markante Strukturen passgenau übereinander zu legen, so dass die einzelnen Bilder sich ergänzend verbinden. Diese Aufgabe kann mit den im Kapitel 5.3 beschriebenen Methoden der Kreuz-Korrelation bewerkstelligt werden. Zwei benachbarte Bilder einer abgetasteten Reihe werden in den Randbereichen überlagert [Abb. 6.3] und die notwendige Verschiebung zur besten Deckung ermittelt. Die Überlagerung funktioniert besonders gut, wenn der Randbereich eine kontrastreiche Struktur aufweist. Dieser Ablauf wird nun für jedes Bild wiederholt und so eine ganze Bildzeile zusammengesetzt. Die nächste Bildzeile wird äquivalent zusammengesetzt und an die erste Zeile angesetzt. Da zwischen dem Verschieben der motorisierten Achsen der Sensor von der Probe gehoben und wieder neu approached werden muss, können sich Unterschiede im Z-Offset einstellen. Nebst der Anpassung der Position der einzelnen Bilder können auch diese Fehler, die sich durch unterschiedliche Helligkeiten im Bild zeigen, angepasst werden.

Die Automatisierung des Ablaufs der Kombination von Einzelbildern zu einem Mosaik hat sich als nicht trivial herausgestellt. Vor allem Bildbereiche mit geringer oder periodischer Struktur können zu massiven Fehlern im auswertenden Algorithmus führen. Ein manuelles Eingreifen ist in den meisten Fällen nicht vermeidbar.

Bild 6.2 zeigt ein Beispiel für so ein Mosaik aus einzelnen Bildern. Die Darstellung zeigt ein grosses Stück eines Mikroprozessors von $300 \times 300 \mu\text{m}^2$. Das so gewonnene Bild besitzt die beachtliche Grösse von 2400×2400 Pixel.

6.3 Vision: Intelligentes Positionieren und Messen

Eine mögliche Weiterentwicklung des in dieser Arbeit vorgestellten Gerätes wäre die Einbindung von Videodaten zur automatischen Positionierung der Messspitze auf eine markante Struktur. In der Industrie bereits erfolgreich eingesetzte Algorithmen zur Erkennung von Mustern könnten auch in Kombination mit dem RAFM eingesetzt werden. Die bereits in LabVIEW vorhandenen Bilderkennungs-Module könnten in die bestehende Software integriert werden. Die aus der Bildauswertung erlangten Verschiebungsvektoren, könnten als Eingangsgrösse für die Steuerung der Robotik verwendet werden und so

einen mit Bilddaten gesteuerten Positionsregler formen.

Dies hätte zur Folge, dass makroskopische Bereiche mit einer relativ geringen Auflösung voruntersucht würden und der hochauflösende AFM-Scanner nur gezielt eingesetzt werden könnte. Der Vorteil dieser Lösung gegenüber dem grossflächigen Abtasten einer Oberfläche und dem nachträglichen Untersuchen der Messwerte liegt im beträchtlichen Geschwindigkeitsvorteil.

7 Usability Study: Das RAFM als E-Learning Werkzeug

7.1 Motivation

Um die Konzepte aus Kapitel 3.1 und den Nutzen des RAFM als E-Learning Werkzeug zu überprüfen, wurde eine Studie mit verschiedenen Benutzergruppen durchgeführt. Im Rahmen der Studie mussten die Testpersonen unterschiedliche Experimente mit dem RAFM durchführen. Damit die Resultate der Studie möglichst eine repräsentativen Aussage liefern, wurden unterschiedliche Personen getestet.

Die Benutzergruppen lassen sich in folgende Kategorien unterteilen:

- Schülerinnen und Schüler der oberen Gymnasialstufen
- Studierende mit nicht physikalischem Hintergrund
- Studierende, die im Hauptfach Physik studieren

Im ganzen befanden sich fünf Frauen und zwanzig Männer unter den Kandidaten. Die grundlegende Gestaltung der Lektion orientierte sich am dreistufigen Ausbildungskonzept aus Kapitel 3.1.

7.2 Der Lektionsablauf

Die Kandidaten der Studie erhielten als erstes eine kurze Einführungslektion in das Gebiet der Nanotechnologie. In dieser Lektion wurde der Übergang von der makroskopischen zur Mikro- und Nanotechnologie besprochen. Ein geschichtlicher Rückblick zeigte die wesentlichen Entdeckungen, das STM und AFM sowie deren Funktionsprinzipien. Nach dieser eher allgemeinen Einleitung wurde die grundlegende Bedienung des RAFM erläutert. Hier wurden die Elemente der Benutzerschnittstelle erklärt und die Werkzeuge zur Analyse der Messungen demonstriert. Ebenfalls diskutiert wurden die unterschiedlichen Experimente, deren Ablauf und die erwarteten Resultate.

7.3 Die Experimente

Den Testpersonen wurden zwei Experimente vorgestellt, welche beide zu lösen waren.

Im ersten Experiment musste eine präparierte CD-Rom abgetastet werden, um den Speicherplatz einer ganzen Disk zu bestimmen. Im zweiten Experiment ging es um den Vergleich von Zucker und Salz. Die wesentlichen Handgriffe und Manipulationen zur Lösung der Experimente sind:

- Probenauswahl
- Kontrolle der Spitze und der Messung durch Approach, Withdraw, Start und Stop
- Mehrfaches Auswerten der Messungen zur Bestimmung der relevanten Messgrößen
- Optimieren einer Messung mit den Parametern: X-tilt, Y-tilt, Gain, Offset und Feedback-Verstärkung, Scanrange und Setpoint des Reglers im Experten-Modus
- Fein-Positionieren der Spitze im Experten-Modus



Abbildung 7.1: Im Rahmen der Evaluations-Phase testet eine Gruppe von Gymnasiasten das RAFM.

Die Arbeiten mussten durch entsprechende vorbereitete Laborberichte dokumentiert werden, die anschließend bewertet wurden. Abschliessend mussten die Kandidaten und Kandidatinnen einen Fragebogen mit zehn Fragen beantworten. Dieser wurde ausgewertet und die Resultate in dieser Arbeit präsentiert und interpretiert.

7.4 Die Test-Umgebung

Für die Studie wurde die Infrastruktur eines modernen Computer-Labors des Instituts für Physik benutzt. Es standen sechs Arbeitsstationen zur Verfügung. Das RAFM selbst wurde in einem entfernten Labor autonom, ohne Operator betrieben. Alle Kandidaten waren im Besitz eines Login um mit dem Gerät Kontakt aufzunehmen. Nach Absprache erhielten die Teilnehmer ein Login für den Experten-Modus, der im Kapitel 3.4 näher beschrieben wird. Es bestand die Möglichkeit einzeln, oder in Zweiergruppen an den Computer zu arbeiten.

7.5 Resultate der Studie

Die Auswertung der Fragebogen fand durch eQuality, eine unabhängige Dienstleistungsinstanz des VCS statt. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Auswertung der Studie vorgestellt, die im Anhang (Referenz) als ganzes vorliegt.

7.5.1 Gesamteinschätzung

Die Gesamteinschätzung der Evaluations-Lektion mit dem RAFM fiel insgesamt sehr positiv aus. Auf einer siebenstufigen Skala werden nur die drei positivsten Kategorien gewählt, wobei die positivste Kategorie "sehr gut" deutlich überwiegt. Es liessen sich bei der Auswertung keine signifikanten Geschlechtsunterschiede oder Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Testpersonen ausmachen (Abb. 7.2). Als Begründung für diese positive Einschätzung kann man insbesondere zwei Gründe nennen.

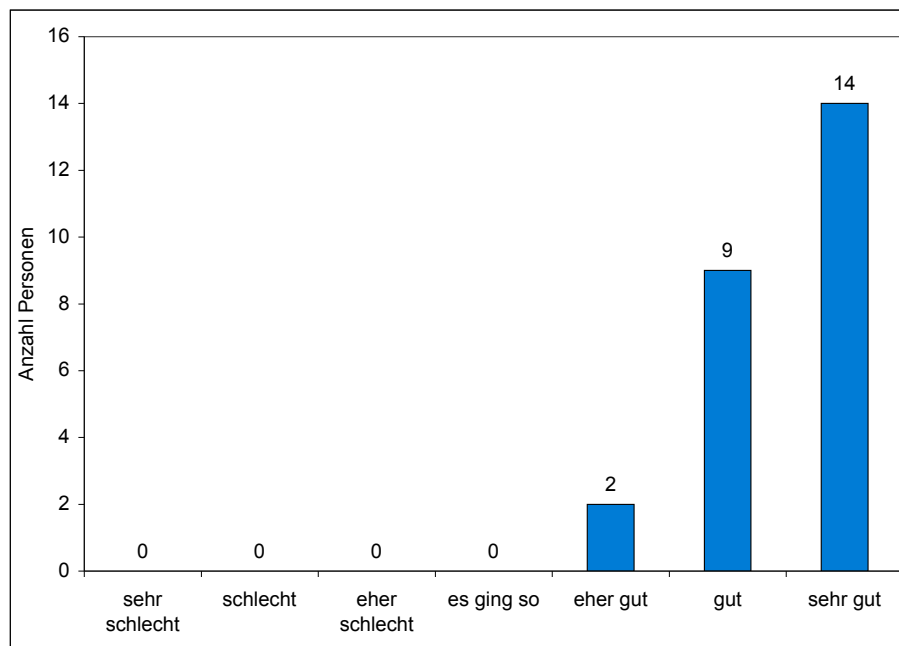


Abbildung 7.2: Gesamteinschätzung der Nanolektion durch die Testpersonen (N=25).

Zum einen zeigte sich, dass das RAFM ein optimales Gerät ist, um eine interessante und verständliche Einführung ins Thema der Nanotechnologie zu bieten. Zum anderen wurde die Praxisnähe, die das RAFM gewährt, sehr geschätzt. Die Möglichkeit der Umsetzung der im ersten Teil der Lektion gelernten Theorie in die darauf folgende Praxisarbeit am realen Gerät wurde als klarer Vorteil des RAFM klassifiziert. Die generell positive Einschätzung ist auch auf die faszinierende Wirkung der Nanowissenschaften als aktuelles und sehr interessantes Gebiet der aktuellen Forschung zurück zu führen. Weiter hat sich gezeigt, dass die hohe Autonomie der Personen, die im Observer-Mode arbeiten, positiv aufgefallen ist. Die Klassifizierung in die beiden Benutzerarten Controller und Observer ist nicht negativ eingestuft worden. Tabelle 7.1 zeigt die wesentlichen genannten Kommentare zur Gesamteinschätzung des Systems.

7.5.2 Lernerfolg

Die Studie zeigte, dass die Mehrheit der Personen mit dem RAFM viel bis sehr viel Neues lernen konnten. Nur vier Testpersonen positionieren sich in der Mitte einer fünfstufigen Skala. In der Evaluation zeigte sich jedoch, dass signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Testpersonen auszumachen sind. Wie Abbildung 7.3 zeigt, konnten die Gymnasiasten am meisten von der Lektion profitieren. Mehr als 80 Prozent dieser Gruppe gaben an, sehr viel gelernt zu haben. Bei den Physikstudierenden ist die Streuung des Lernzuwachses am grössten, gesamthaft ist er aber trotzdem positiv

Nennungen	Anzahl
Sehr gute, spannende, interessante, verständliche Einführung, gut erklärt (nicht zu lange, aber doch informativ)	9
Faszinierendes, aktuelles, sehr interessantes Gebiet	9
Abwechslung zum Alltag, etwas Neues, Unbekanntes gelernt	6
Gute Theorie-Praxis-Verschränkung, praxisnah, praxisorientiert	4
Gemütliche, angenehme Atmosphäre	3
Interessant, nie langweilig	3
Hohe Eigenaktivität, selbstständiges Arbeiten, learning by doing	3
Spannende, tolle Erfahrung, mit dem AFM arbeiten	3

Table 7.1: Die wichtigsten Begründungen für die Einschätzung der Lektion (Mehrfachnennungen möglich)

ausgefallen. Dieses Resultat ist auf die Auslegung der Experimente zurückzuführen. Sie waren eher einfach gehalten, um allen Kandidaten einen grundlegenden und verständlichen Einblick in das Gebiet der Nanotechnologie zu bieten. Der Lernerfolg der unterschiedlich ausgebildeten Personen ist also abhängig von den zur Verfügung stehenden Experimenten. Je mehr die Komplexität des Experiments dem Wissensstand der entsprechenden Benutzer Rechnung trägt, um so mehr Lernerfolg kann erzielt werden. Das hier verwendete Ausbildungskonzept erfordert also dennoch ein gutes Abstimmen der gestellten Aufgaben auf den Wissensstand der Lernenden. Über- und Unterforderung wirken sich trotz der vielschichtigen Gestaltung der Lektion auf den Lernerfolg aus. Es sei nebenbei erwähnt, dass ein Geschlechterunterschied laut der Studie nicht auszumachen ist. Auf die Frage, was in dieser Lektion genau gelernt wurde, wurden vielfältige Antworten gegeben. Die häufigste Aussage bezieht sich auf die neue Erfahrung, mit dem Computer und einem realen Gerät - dem RAFM - Messungen vorzunehmen zu können, die sonst in diesem Umfeld nicht möglich wären. Viele Studierende nannten die Funktionsweise der verschiedenen Mikroskoptypen als wichtigen Punkt, den sie kennen lernten.

Die Studie zeigte, dass ein Gerät wie das hier präsentierte RAFM verwendet werden kann, um die grundlegenden Werkzeuge und Messprinzipien der Nanotechnologie zu vermitteln. Durch den Einsatz eines solchen Gerätes können allgemeine Begriffe der Messtechnik und insbesondere der Nanotechnologie vermittelt werden.

7.5.3 Interesse, mit dem RAFM zu arbeiten

Eine Mehrheit der Befragten beurteilte das Lösen der Experimente als spannend oder sehr spannend. Nur sechs Testpersonen positionierten sich in der Mitte der fünfstufigen Antwortskala. Die Studie hat gezeigt, dass zwischen dem zu lösenden Experiment und der ganzen Lektion eine Korrelation festzustellen ist. Je besser einer Testperson das Experiment gefiel, desto besser beurteilte diese Person die ganze Lektion. Bemerkenswert ist auch das geschlechterabhängige Interesse an den Experimenten. Die technisch Ausrichtung der Experimente sprach die Männer deutlich besser an, nur 10 Prozent entschieden sich für eine mittlere Antwortkategorie. Bei den Frauen liegt dieser Wert bei 80 Prozent.

Eine differenziertere Auswertung der Antworten zeigte, dass vor allem das reale Abtasten, das direkte Betrachten und das Berechnen von Oberflächenstrukturen am meisten fasziniert hat. Laut der Studie liegt

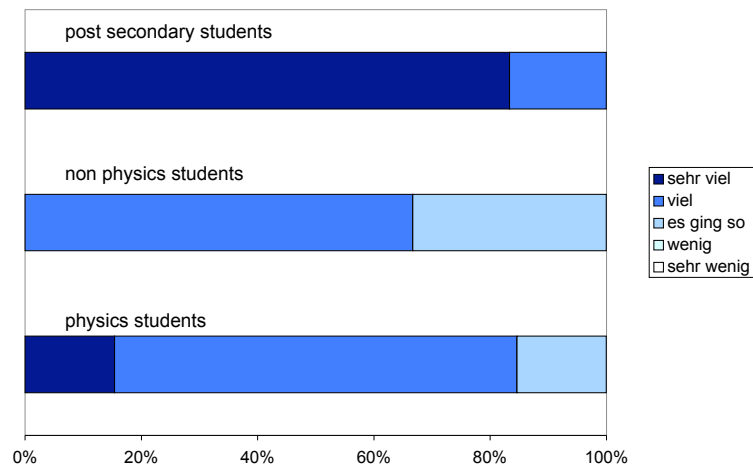


Abbildung 7.3: Lernzuwachs durch die Nanolektion ($N=25$).

ein grosser Vorteil des RAFM in der Möglichkeit des Einstellens von real wirkenden Parametern und den dadurch zu beobachtenden Veränderungen der Messung. Ein Sachverhalt, der durch entsprechende Simulatoren nur näherungsweise erreicht werden kann.

Ein ebenfalls wichtiger Indikator für den Erfolg einer Lektion ist die Frage nach dem ersten Auftreten von "Langweilig". Die Auswertung der Daten zeigte, dass sich die Mehrheit der Befragten während der ganzen Zeit nie langweilte (vgl. Abbildung 7.4). Bezüglich des ersten Auftretens von Langeweile liess sich weder ein geschlechtsspezifischer Effekt noch ein Unterschied basierend auf den verschiedenen Typen von Testpersonen ausmachen.

7.5.4 Nutzen der kollaborativen Steuerung

Die Kandidaten der Studie arbeiteten und lösten die Aufgaben am Mikroskop mit Hilfe der kollaborativ ausgelegten Software (vgl. Kapitel 3.3). Die Partnerarbeit war für viele eine klare oder teilweise Hilfe. Beobachtungen während der Studie zeigten, dass die kollaborative Steuerung zwar intensiv genutzt wurde, aber eher einen latenten Charakter hatte. Durch die völlige Autonomie bei der Auswertung der gewonnen Messdaten, zeigt sich der kollaborative Ansatz eher beim chronologischen Ablauf des Experiments und beim Vergleichen und Zusammenführen der Resultate. Man darf daraus schliessen, dass der gewählte Ansatz für diese Art von Gerät optimal ist. Die direkte, nur einem Benutzer gehorchende Steuerung der Mechanik des RAFM nimmt nur einen geringen Teil der für ein Experiment benötigten Zeit in Anspruch. Die gesamte Auswertung von Daten zur Ermittlung des gewünschten Resultats läuft im voll kollaborativen Observer-Modus. Auffallend ist auch, dass sich zwangsläufig alle Gruppenmitglieder gleichzeitig im selben Stadium des Experiments befanden. Dadurch konnten durch Vergleiche mit anderen innert kürzester Zeit korrekte Ergebnisse gewonnen werden. Eine effizienzsteigernde Gruppendynamik wurde ebenfalls beobachtet. Kandidaten, die langsamer voran kamen, wurden durch die schneller arbeitenden motiviert.

Die Möglichkeiten der Kommunikation durch die integrierte Chat-Box wurde nur wenig und im Speziellen zum Austausch von Resultaten verwendet. Um den Nutzen dieser Einrichtung aber schlüssig

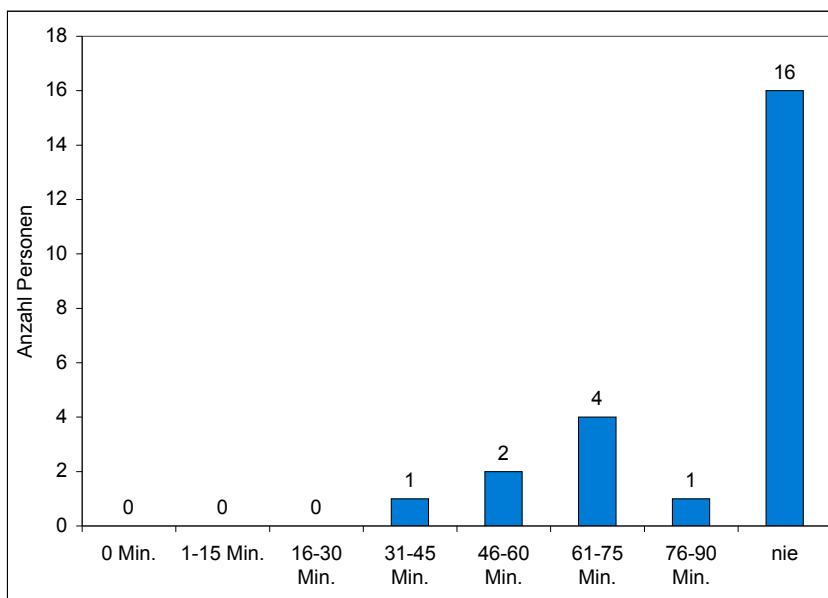


Abbildung 7.4: Zeitpunkt des erstmaligen Auftretens von Langeweile (N=25).

überprüfen zu können, müsste ein Test ohne die Möglichkeit der verbalen Kommunikation durchgeführt werden. Ein Einfluss von Geschlecht oder Studententyp liess sich bei den Präferenzen der Sozialform nicht aufzeigen.

7.5.5 Qualität der eingesetzten Technik

Die Befragten der Studie sind sich einig, dass die technische Realisierung des RAFM sehr gut gelungen ist. Das Gerät arbeitet stabil und ist fehlertolerant. Es hat sich aber gezeigt, dass, je besser das fernsteuerbare Mikroskop aus Sicht der Testpersonen funktionierte, desto besser hat ihnen die Lektion insgesamt gefallen.

7.6 Schlussfolgerung der Studie "E-Learning"

Die Studie zeigte einen klaren Nutzen des RAFM und dem dahinter stehenden Ausbildungskonzept für die Ausbildung im Bereich Nanotechnologie. Vor allem der Observer-Mode mit dem hohen Grad an individueller Interaktion erwies sich als klarer Vorteil der kollaborativen Benutzerschnittstelle. Die Studenten arbeiteten als Team an der selben Stufe des experimentellen Ablaufs, mit dem Vorteil von individuell zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln zur Analyse. Die dadurch erarbeiteten Resultate ergänzten sich zu einer optimalen Lösung der gestellten Aufgabe.

8 Fazit und Ausblick

Ziel der Arbeit war es, die Einsatzmöglichkeiten eines typischen Instruments aus der Nanotechnologie im Bereich der Ausbildung und in der Industrie auszuloten.

Die Arbeit zeigt, dass das Instrument Rasterkraft-Mikroskop in der Bedienung abstrahierbar ist und so die Möglichkeit besteht ein Gerät aus der Nanotechnologie Nicht-Experten zugänglich zu machen.

Für die Ausbildung in der Nanowissenschaft hat das zur Folge, dass ein aktuelles und zukunftsträchtiges Gebiet der Forschung durch die geeignete Bedienungskonzepte des RAFM Studierenden mit unterschiedlichem Wissenstand zugänglich wird, ohne auf charakteristische Eigenschaften des Gerätes zu verzichten. Dank der kollaborativen, internetkompatiblen Benutzerschnittstelle des RAFM können mehrere Benutzer das Instrument gleichzeitig bedienen und ihr Wissen gemeinsam für Experimente einsetzen. Das Potenzial und die funktionstüchtige Umsetzung der unterschiedlichen Ausbildungskonzepte des RAFM hat sich mit einem Verkauf eines solchen Instruments an die Arizona State University bestätigt. Für den industriellen Einsatz hat sich gezeigt, dass viele Schritte bei einer Messung programmier- und automatisierbar sind. Dadurch wird es möglich, den Messprozess so weit zu abstrahieren, dass die zu messende Grösse in den Mittelpunkt rückt und das Messgerät das Mittel zum Zweck wird. Diese Abstraktion beinhaltet nicht nur eine einfach zu bedienende Benutzerschnittstelle, auch die automatische Auswertung von Messdaten und die Reduktion einer Messung auf einen Wert mit Relevanz für die Anwendung werden dadurch möglich.

Das Instrument RAFM besitzt durch die flexible Steuer-Software ein enormes Erweiterungspotenzial. In weiteren Schritten wird versucht, den mikroskopischen Bildausschnitt einer Messung mit den makroskopischen Informationen der Videoinformation zu verbinden. Durch diese Kombination sollen interessante Strukturen auf Proben selbständig gefunden, gemessen und die Daten autonom analysiert werden.

Im weiteren wird das Zweitgerät in den U.S.A ebenfalls international als Ausbildungsgerät zur Verfügung stehen. Damit ist der Grundstein für ein Netzwerk von zugänglichen Rasterkraft-Mikroskopen gelegt. Es wird angestrebt, weitere Instrumente an Institutionen mit unterschiedlichen Fachgebieten im Bereich der Nanowissenschaften zu platzieren. Dadurch wird es Studierenden möglich, sich vom persönlichen Arbeitsplatz aus Expertenwissen aus realen Experimenten verschiedener Spezialgebiete anzueigen.

A Curriculum Vitae

Peter Renato Fornaro

Anschrift:	Peter Fornaro Jungstrasse 34 4056 Basel
Persönliche Daten:	Geboren am 3. April 2004 AHV Nr. 352.73.203.115 Heimatort: Känerkinden BL Familienstand: verlobt
Ausbildung:	1980 - 1985 Besuch der Primarschule Sissach. 1985 - 1989 Besuch der Sekundarschule Sissach. 1989 - 1993 Lehre als Automatiker bei Kriegel und Schaffner AG, Basel (Elektroniker, mit Schwerpunkt Mess-, Steuer-, Regeltechnik) 1993 - 1999 Ingenieurschule beider Basel, Muttenz Fachrichtung Elektrotechnik mit Schwerpunkt Nachrichtentechnik 1999 - 2001 Nachdiplomstudium in wissenschaftlicher Fotografie Institut für Physikalische Chemie, Uni Basel Hauptthemen: analoge und digitale Bildverarbeitung, Bildrekonstruktion, Archivierung, Web-Design 2001 - 2004 Dissertation in Physik Institut für Physik, Uni Basel Hauptthemen: Nanotechnologie, Scanning Probe Microscopy

A Curriculum Vitae

- Berufserfahrung: 1996 - 2000 Mitarbeit in der Elektronik-Entwicklung
Institut für Physik der Universität Basel,
unter dipl. El.-Ing. H. R. Hidber
Hauptaufgabenbereich:
Entwicklung von Software und Elektronik
für Scanning Probe Microscopes
Mitwirken an Forschungsprojekten in der Gruppe von
Prof. Dr. H.-J. Güntherodt, (NOSE, Smart SPM)
Arbeit als Computerverantwortlicher des Instituts für Physik
- 1999 - 2000 Arbeit als Assistent in der Abteilung für
wissenschaftlichen Fotografie
unter PD Dr. R. Gschwind
- 2000 - Arbeit als freischaffender Architektur-Fotograf
mit vertieften Kenntnissen in digitaler Fotografie
- Lehrerfahrung: 1999 - 2001 Deutsch- und englischsprachige Praktikumsleitung
in den Bereichen klassische Fotografie
und digital Imaging an der Uni Basel
- 1999 - 2001 Mitarbeit in der Firma Schule-Online
Lehrerweiterbildung in den Bereich neue Medien und Internet
- 2001 - 2004 Informatik-Lehrer am Gymnasium am Münsterplatz
- 2001- 2004 Dozent für Multimediatechnik an der Fachhochschule beider Basel
- Fremdsprachen: Englisch: Verhandlungssicher in Wort und Schrift
- Hobbies: Internet-Technologien, Fotografie, Radsport, Alpinismus

B Poster, Vorträge und Publikationen

Gehaltene Vorträge

- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Freiburghaus E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: The Remote Atomic Force Microscope
VCS Days 2001, 12. September 2001, Fribourg, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: The Virtual Learning Environment on Nanoscience
Learntec 2002, Karlsruhe, D
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Freiburghaus E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: An Interdisciplinary Virtual Laboratory an Nanoscience
Orbit Comdex, 26. Oktober 2002, Basel, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Wattinger E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: The Remote Atomic Force Microscope
Swiss Physical Society, 21. März 2003, Basel, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Wattinger E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Teaching Physics in the 21th Century, the ADIOS Project
Swiss Physical Society, 21. März 2003, Basel, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Wattinger, E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Remote Atomic Force Microscopy
NanoTribo, 19. Oktober 2003, Portovenere, I
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Wattinger, E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Educating Nano-Science: Usability Study with the Remote Atomic Force Microscope
Swiss Physical Society, 4. März 2004, Neuenburg, CH

Präsentierte Poster:

- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Remote Microscopy
Twannberg Seminar, 18. Oktober 2001, Twannberg, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: The Remote Atomic Force Microscope
NCCR Präsentation Institut für Physik, 10. April 2002, Basel, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
The Fully Automated AFM
NCCR Präsentation Institut für Physik, 18. September 2002, Basel, CH

- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Wattinger, E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: The Remote Atomic Force Microscope
Tag der offenen Tür am Institut für Physik, 9. Januar 2003, Basel, CH
- P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, Ch. Wattinger, E. Meyer and H.-J. Güntherodt.
Nano-World: The Remote Atomic Force Microscope
NanoTribo, 19. Oktober 2003, Portovenere, I

Publikationen:

- H.P. Lang, M.K. Baller, F.M. Battiston, J. Fritz, R. Berger, J.-P. Ramseyer, P. Fornaro, E. Meyer and H.-J. Güntherodt and J. Brugger, U. Drechsler, H. Rothuizen, M. Despont, P. Vettiger, Ch. Gerber and J.K. Gimzewski
The Nanomechanical NOSE
12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems”
- H.P. Lang, M.K. Baller, R. Berger, Ch. Gerber, J.K. Gimzewski, F.M. Battiston, P. Fornaro, J.P. Ramseyer, E. Meyer, H.-J. Güntherodt
An Artificial Nose Based on a Micromechanical Cantilever Array
Analytica Chimica Acta, 393(59), 1999
- M. Guggisberg and P. Fornaro and T. Gyalog and H. Burkhart
An Interdisciplinary Virtual Laboratory on Nanoscience
Future Generation Computer Systems, 19(1), 133-144, 2003
- C. Wattinger and P. Fornaro and M. Guggisberg and T. Gyalog and H. Burkhart
Monitoring and Controlling Scientific Experiments: Anywhere - Anytime
ERCIM News, 52, 13-15, 2003
- M. Guggisberg and P. Fornaro and A. Smith and T. Gyalog and C. Wattinger and H. Burkhart
Collaborative Nanoscience Laboratory with Intergrated Learning Modules
CHIMIA, 57, 3, 128, 2003
- Ch. Freiburghaus, T. Gyalog, M. Guggisberg, P. Fornaro, S. Kannokadan, H. Burkhart, T. Fink, H. Siegenthaler and H.-J. Güntherodt, Eclimate: Creating a motivating virtual learning environment,
Proceedings 4th ICNEE Lugano, 1.2/7, 2003

C Bedienungsanleitung des Remote Atomic Force Microscope

Im folgenden Kapitel wird der Aufbau und die Inbetriebnahme der unterschiedlichen Komponenten des Remote Atomic Force Microscope (RAFM) detailliert beschrieben. Zusätzlich werden die wesentlichen Abläufe zur Inbetriebnahme vorgestellt und die wichtigsten Arbeitsabläufe erklärt. Im letzten Teil des Kapitels wird auf Fehler und ihre Behebung eingegangen.

C.1 Die Komponenten des Remote Atomic Force Microscope

C.1.1 Das AFM

Der eigentliche Messkopf [vgl. Nr. 1 in Abb. C.1] des RAFM ist ein kommerzieller $100\mu\text{m}$, Contact-Mode Scanner der Firma Nanosurf AG. Der Messkopf wird auf dem Z-Lift der Robotik platziert. Die technischen Daten des Mikroskop-Kopfes sind dem Benutzerhandbuch des Messkopfherstellers Nanosurf [37] zu entnehmen. Der Messkopf verfügt über eine eingebaute CCD-Videokamera zur Übertragung von Videobildern der Messspitze. Es Kamera unterstützt zwei Betrachtungswinkel: Eine Aufsicht und eine 45° Seitenansicht. Das Videosignal wird im PAL-Composite Format bereitgestellt. Die elektrischen Verbindungen des AFM-Messkopfes werden direkt an die geräteeigene Elektronik angeschlossen.

C.1.2 Die Robotik mit dem Probenstisch

Auf dem mechanischen Probenstisch [vgl. Nr. 2 in Abb. C.1] werden unterschiedliche Proben fixiert und zur Messung vorbereitet. Die präparierten Proben werden mit geeignetem Klebematerial auf dem Aluminiumteller befestigt. Die maximale Anzahl von Proben ist nur durch die Geometrie der Proben selbst beschränkt. Die Software erlaubt das genaue Anfahren jeder beliebigen Position mit einer Präzision von unter $1.5\mu\text{m}$, die innerhalb der Reichweite von 14mm liegt. Für automatische Anwendungen können auf dem Probenstisch spezifische Halterungen montiert werden. Dies erlaubt den raschen, klebstofffreien Wechsel von zu untersuchenden Objekten.

Der Z-Achsen Lift dient als Plattform für den Mikroskop-Kopf. Die Plattform besitzt zwei Vertiefungen und eine Messingauflage, um das Mikroskop genau zu platzieren. Die z-Achse, sowie die x-, und y-Achse werden per Software motorisch angetrieben.

Seitlich an der Grundplatte befinden sich zwei Sub-D Steckeranschlüsse für die elektrische Verbindung mit der Steuerelektronik zur Motorsteuerung (Nr. 10), (Nr. 11).

C.1.3 Die Elektronik

Die elektronischen Komponenten des RAFM bestehen aus folgenden Komponenten:

- Einer digitalen Input/Output-Karte von National Instruments [40] vom Typ PCI-1200 mit einem 50pol Flachband-Anschluss

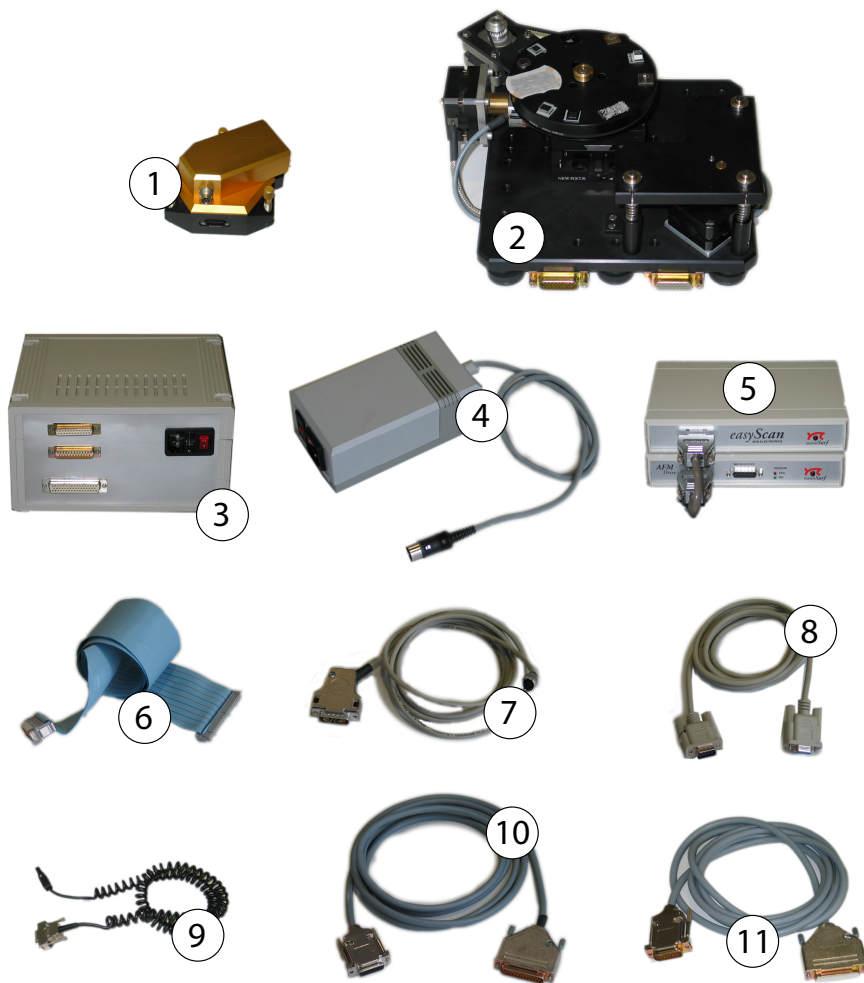


Abbildung C.1: 1: AFM-Messkopf, 2: Robotik, 3: Power Control Unit, 4: Netzteil, 5: AFM-Elektronik, 6: 50pol Flachbandkabel, 7: AFM Videokabel, 8: RS232 Kabel, 9: AFM-Steuerkabel, 10: Robotic-Kabel A, 11: Robotic-Kabel B

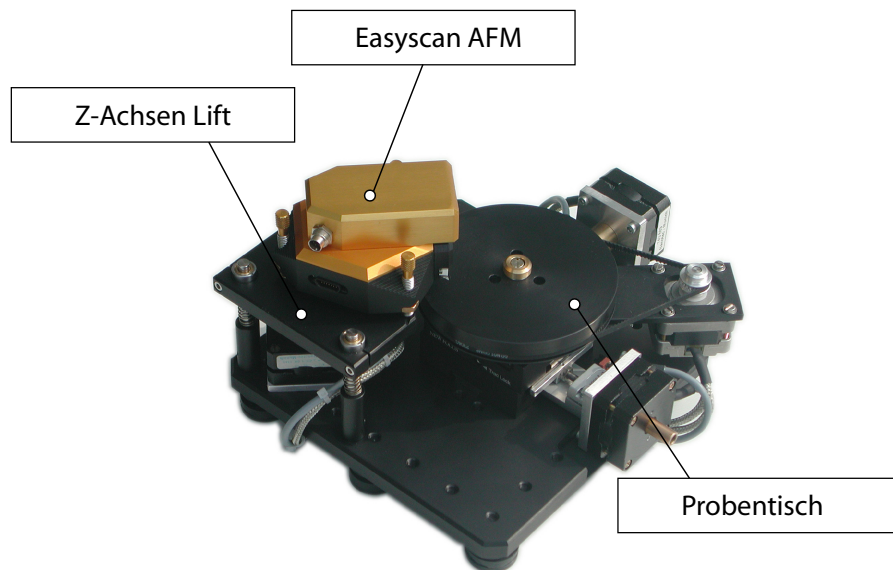


Abbildung C.2: Die wichtigsten Bestandteile des mechanischen Aufbaus: Der Scankopf, der Z-Achsen-Lift und der Probentisch.

- Einer Steuereinheit für die Schrittmotoren mit der Bezeichnung Power Control Unit (PCU)(Nr. 3). Die PCU besitzt einen 50pol Flachband-Anschluss (Nr. 6) für die Verbindung mit dem Steuercomputer, sowie zwei Sub-D Anschlüsse für die Verbindung mit dem Probentisch.
- Einer aus zwei Elementen bestehenden easyAFM Elektronik der Firma Nanosurf zur Ansteuerung des AFM Messkopfes. Diese Elektronik besitzt einen 9-pol Anschluss für die serielle Verbindung (Nr. 8) zum Steuercomputer, einen Sub-D Anschluss für die Verbindung mit dem Messkopf (Nr. 9), sowie einen Spezialstecker für die Verbindung zur Videokamera im Messkopf (Nr. 7).

Die Verbindungen der unterschiedlichen Komponenten werden in Bild C.9 schematisch dargestellt.

C.1.4 Die Staubschutzhaube

Um das Gerät vor Verschmutzung zu schützen, wird der Aufbau durch eine Plexiglas-Haube abgedeckt. Die Haube besitzt eine Öffnung für die diversen Kabel des Geräts. Die Haube sollte zum Schutz der Apparatur ausser für Wartungsarbeiten immer aufgesetzt bleiben.

C.1.5 Dämpfungsmassnahmen

Um das Gerät vor Erschütterungen zu schützen, wird eine passive Dämpfungseinrichtung verwendet. Diese besteht aus einer Schaumstoffplatte und einer Marmorplatte mit einer grossen Masse. Diese Dämpfungseinrichtung ist in den meisten Fällen genügend. Sind am Ort des Gerätes stärkere Erschütterungen zu erwarten, empfiehlt sich der Einsatz einer aktiven Einrichtung.

C.1.6 Der Steuercomputer

Als Steuercomputer wird ein normaler Personal Computer mit Windows Betriebssystem eingesetzt. Der Rechner benötigt eine lauffähige Version von LabView 7.0 [40] zur Ausführung der RAFM-Server Soft-

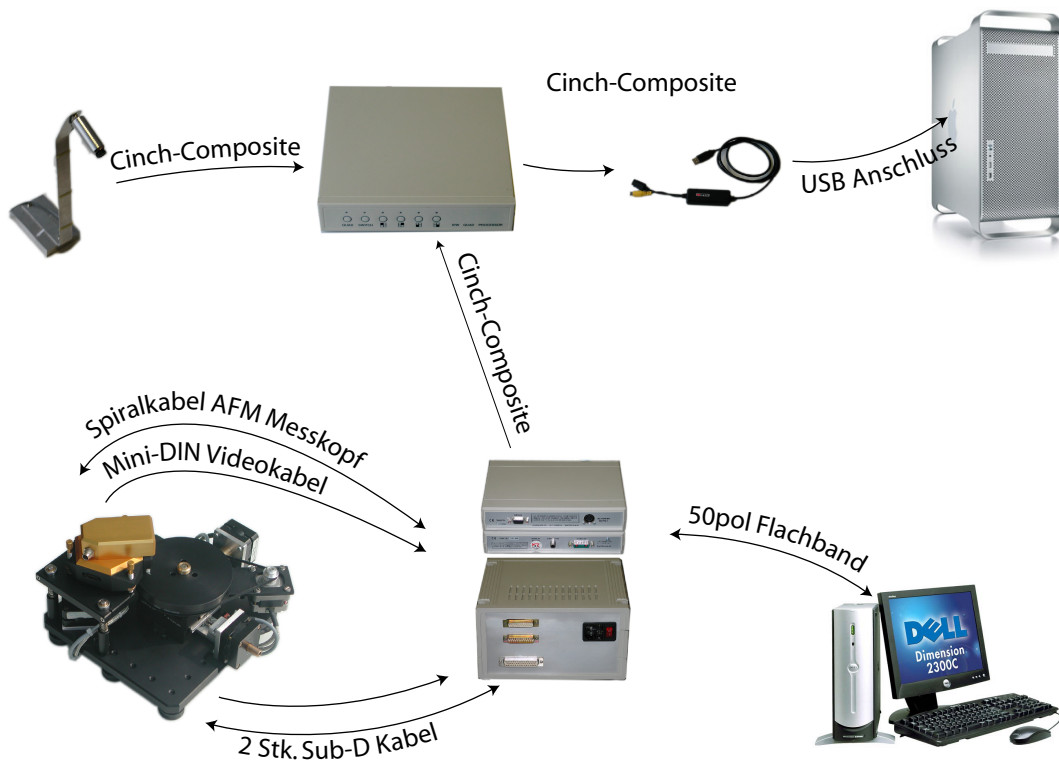


Abbildung C.3: Die elektrischen Verbindungen in einer schematischen Darstellung.

ware. Zusätzlich benötigt der Rechner eine digitale I/O Karte vom Typ PCI-1200. Die Mindestvoraussetzungen an die Hardware sind:

- 256 MByte RAM
- 800 MHz CPU Clock
- 200MByte freier Festplatten Speicher
- 10 Mbit/s Ethernet TCP/IP Verbindung

C.1.7 Der Kommando-Broadcaster

Der Kommando-Broadcaster ist ebenfalls ein normaler Personal Computer mit Windows Betriebssystem. Der Rechner muss an einem Ort im Internet aufgebaut werden, der für die potentiellen Benutzer zugänglich ist.

Die Mindestvoraussetzungen an die Hardware des Kommando-Broadcaster sind:

- 128 MByte RAM
- 400 MHz CPU Clock
- 200MByte freier Festplatten Speicher
- 100 Mbit/s Ethernet TCP/IP Verbindung

Der Commando-Broadcaster stellt das Bindeglied zwischen dem öffentlich zugänglichen Teil des Internets und dem internen Teilnetz, in dem das Gerät aufgebaut ist. Die Aufgabe des Kommando-Broadcaster wird in Kapitel 2.2.5 genauer beschrieben.

C.2 Aufbau des Geräts

Um das Gerät in Bereitschaft zu versetzen, sind folgende Arbeitsschritte notwendig:

1. Grundplatte mit Schaumstoffdämpfer positionieren
2. Robotik mittig auf die Dämpferplatte aus Marmor setzen
3. Schrittmotor-Elektronik (PCU) aufbauen
4. Nanosurf Elektronik platzieren
5. Nanosurf Elektronik mit Computer verbinden (Sub-D Serial)
6. 2 Stk. Verbindungskabel Robotik mit PCU verbinden
7. LabView Kabel 50 Pol zur Verbindung des PC mit der PCU einstecken
8. Videoswitch aufbauen
9. Video-Composite Kabel von Nanosurf Elektronik zu Videoswitchbox führen (Eingang 1)
10. Video-Composite Kabel von RAFM-Cam zu Videoswitchbox führen (Eingang 2)
11. AFM mit Nanosurf Elektronik verbinden (2 Kabel, Video und Spiral)
12. AFM auf Z-Tisch setzen (!Gewindestangen des AFM auf richtige Längeneinstellung kontrollieren 9.5mm!)
13. Plexiglashaube platzieren (!Plexiglashaube darf KEINE Teile des AFMs oder der Robotik berühren. Beachtung verlangen vor allem die Verbindungskabel zum AFM-Messkopf!)
14. Alle Netzstecker einstecken NOCH NICHT EINSCHALTEN
15. RAFM-Servercomputer starten

C.3 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme des Servers sind folgende Schritte notwendig:

1. Als Benutzer auf dem Geräteserver anmelden
2. Base-Layer des AFM durch Doppelclick auf das entsprechende Symbol öffnen und starten
3. Base-Layer der Robotik durch Doppelclick auf das entsprechende Symbol öffnen und starten
4. Middle-Layer öffnen und starten
5. Connection-Layer öffnen und Zieladresse und -port des Commando-Broadcasters eingeben und Applikation starten
6. Spannungsversorgung der PCU und der AFM-Elektronik einschalten

Nachdem die Spannungsversorgung eingeschaltet wurde, wird eine automatische Initialisierung und Kalibrierung durchgeführt. Dazu gehört das Herunterladen und Starten der AFM Firmware, die Kalibration der Robotik und die Definition der Start-Parameter.

Um von externer Stelle auf das Gerät zugreifen zu können, muss der Commando-Broadcaster betriebsbereit sein. Die Verbindung zwischen Commando-Broadcaster und dem Connection-Layer des Geräteservers wird automatisch geöffnet. Nachdem erfolgreichen Hochfahren ist das Gerät betriebsbereit. Um mit dem Instrument messen zu können, muss auf einem Computer an einer beliebigen Stelle im Netz eine Client-Application gestartet werden.

C.4 Die erste Messung

C.4.1 Speichern der Positionen der Proben

Um eine erste Messung durchführen zu können, müssen zuerst die Positionen der Proben definiert werden. Diese Arbeit kann durch manuelles Anfahren der Zielposition mit dem Position-Manager erledigt werden [vgl. Abb. C.4]. Mit dem Position-Manager kann jede Achse manuell angesteuert werden. Durch Drücken einer der Knöpfe zur Wahl einer der vier Achsen, wird der entsprechende Stellmotor aktiviert. Mit dem Geschwindigkeitsschieber kann nun der Vorschub des jeweiligen Motors bis zum Erreichen der Zielposition eingestellt werden. Die Position des Messkopfes kann im makroskopischen Bereich von Auge, die genaue Positionierung im Videobild kontrolliert werden. Die Messspitze sollte sich etwa im Abstand von 0,5 mm von der Oberfläche entfernt befinden. Die Koordinaten der Position können mit dem Save-Knopf unter einer Positionsnummer gespeichert werden. Sind alle vorwählbaren Positionen definiert, kann der Position-Manager beendet werden.

Um sich mit dem Mikroskop zu verbinden, muss die Client-Application durch Doppelclick gestartet werden. Es erscheinen zwei Eingabeaufforderungen:

1. Wählen sie zuerst den Verbindungsmodus. Wird die Standardverbindung gewählt, wird eine Voreingestellte IP und Port Nummer verwendet. Die Einstellungen können aber auch beliebig verändert werden [vgl. Abbildung C.5].
2. Nachdem die Verbindung steht, müssen Sie sich beim Geräteserver mit einem Benutzernamen und einem Passwort anmelden [vgl. Abbildung C.6].

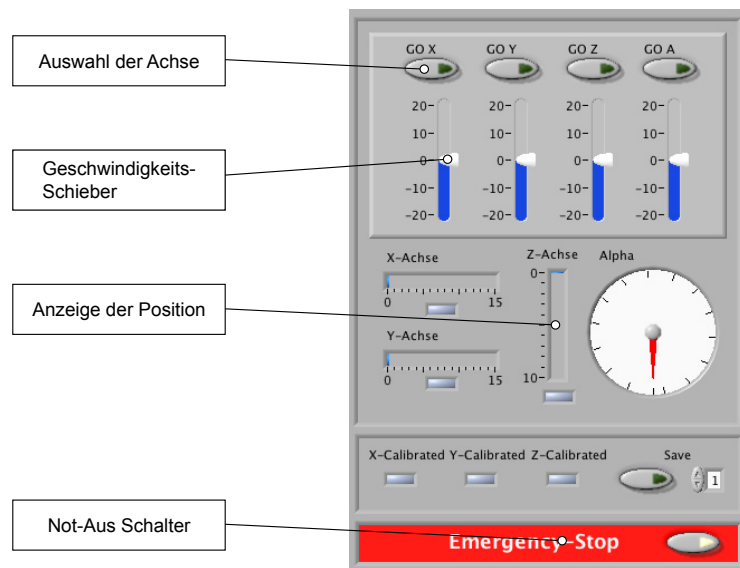


Abbildung C.4: Mit dem Position-Manager können die unterschiedlichen Positionen der Proben eingestellt und gespeichert werden.

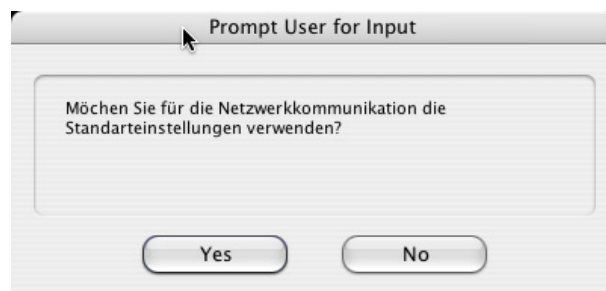


Abbildung C.5: Hier wird definiert, ob die Standardeinstellung oder eine benutzerdefinierte Einstellung für die Netzwerkverbindung verwendet werden soll.

C.4.2 Die Benutzeroberfläche

Die Client-Application stellt sowohl das Bedienpanel des RAFM als auch die Netzwerkverbindung zum Geräteserver zur Verfügung [vgl. Abbildung C.7]. Das Hauptfenster wird in unterschiedliche Bereiche eingeteilt, die es erlauben, das Gerät zu bedienen:

Probenwahl:

In diesem Bereich des Hauptfensters können die unterschiedlichen Experimente gewählt werden. Die Position Stand-By bewegt das Mikroskop in eine Position, die geeignet ist, um Manipulationen am Messkopf durchzuführen, z. B. einen Spitzenwechsel.

Grundlegende Steuerung:

Mit den grundlegenden Steuerelementen kann der Messkopf auf die Oberfläche gesetzt (Approach) und wieder abgehoben (Withdraw) werden. Start setzt eine Messung in Gang, Stop beendet sie.

Status Panel und Moduswechsel:

In diesem Bereich sind die Statusmeldungen des RAFM ersichtlich. Hier wird z. B. angezeigt, dass die gewünschte Position erreicht wurde. Zudem kann hier zwischen den im Kapitel 3.3 beschriebenen Modi umgeschaltet werden.



Abbildung C.6: Die Abfrage für das Zugriffsrecht. Geben Sie hier Ihren Benutzernamen und das Passwort ein.

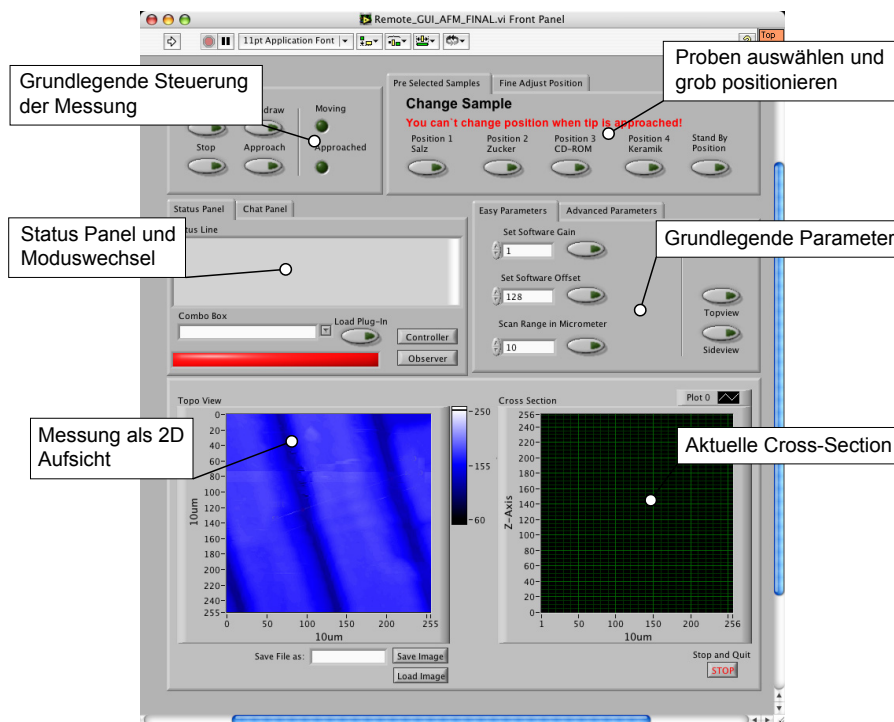


Abbildung C.7: Das Hauptfenster der Client-Application. Man erkennt die unterschiedlichen Panels im Bild.

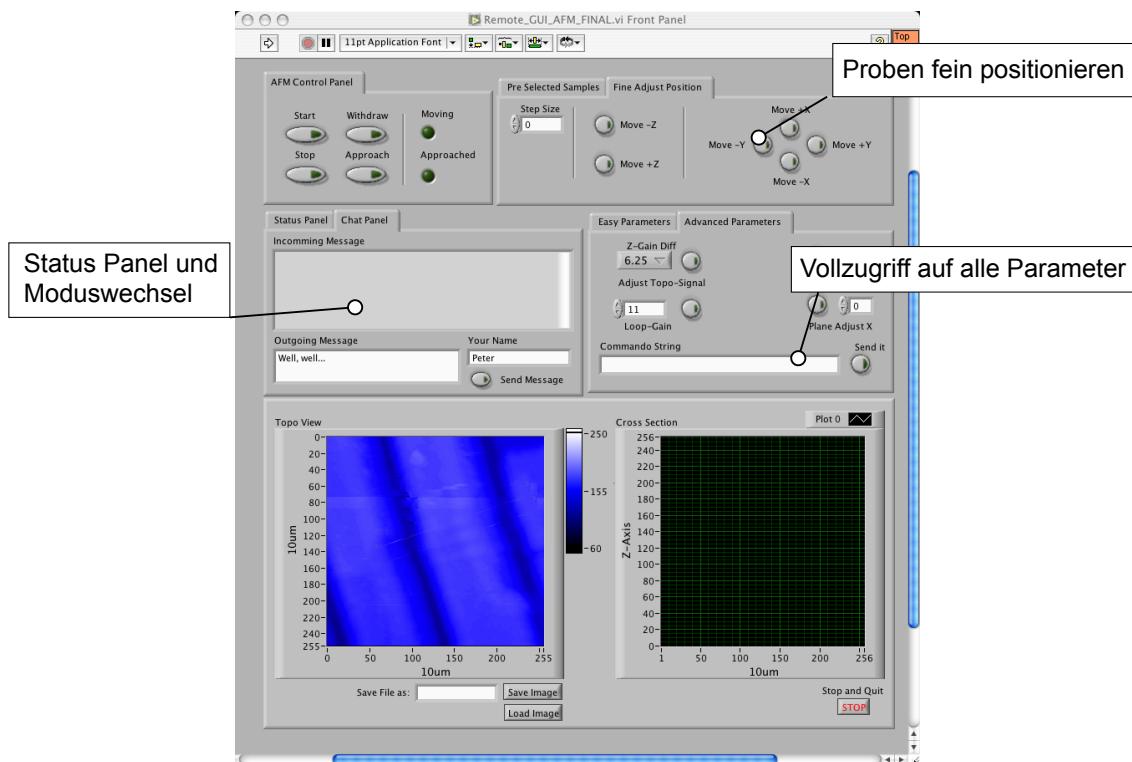


Abbildung C.8: Die karteikartenähnlich aufgebauten Panels können umgeschaltet werden. So wird der Funktionsumfang erweitert oder im Grad der Komplexität angepasst.

Grundlegende Parameter:

Die Grundlegenden Parameter erlauben es, den abzutastenden Bereich zu verändern, den Betrachtungswinkel der CCD-Kamera umzuschalten und Offset und die Verstärkung des Messsignals einzustellen.

Messung als 2D Aufsicht:

In diesem Bereich werden die Messdaten als 2D Aufsichtswerte (x, y Graph) dargestellt. Die Farbe und der Anzeigebereich können beliebig eingestellt werden.

Messung als Cross-Section:

Die Cross-Section (x, z Graph) zeigt die aktuelle Messzeile als Schnittbild an.

Die drei Bereiche Parameter-Panel, Position-Panel und Status-Panel können umgeschaltet werden [vgl. Abbildung C.8]. Durch Umschalten des Status-Panel gelangt man ins Chat-Panel (nur in der Mehrbenutzerumgebung nutzbar). Durch Umschalten des Parameter-Panels können weitreichende Befehle und Parameter zum Gerät gesendet werden. Durch Umschalten des Position-Panel gelangt man zum Panel zur Feinpositionierung der Robotik. Der Messkopf kann mit dieser Funktion feinpositioniert werden und an jede beliebige Stelle im Arbeitsbereich gefahren werden. Das Umschalten des Parameter-Panel und des Position-Panel benötigt ein Experten-Passwort [vgl. Kapitle 3.4]. Es besteht die Möglichkeit, das Gerät mit den unterschiedlichen Knöpfen der Oberfläche zu steuern oder mit einem Kommando-String im Parameter-Panel für Experten. Die möglichen Befehle zur Gerätesteuerung sind im Anhang [vgl. Anhang D], der Aufbau der Kommandosprache im Kapitel 2.2.3 ersichtlich.

C.4.3 Proben Wahl und Messbeginn

Nach erfolgreichem Anmelden wird das Hauptfenster der RAFM-Steuerung dargestellt. Im Position-Panel des Hauptfensters kann eine der Proben angewählt werden. Das Erreichen der Zielposition wird durch die Statusmeldung "P0 OK" bis "P4 OK" bestätigt. Im Videobild kann die grobe Positionierung verfolgt werden. Nachdem die Positionierung erfolgte, kann durch Approach die Messspitze mit der Oberfläche in Kontakt gebracht werden. Jetzt sind die persönlichen Einstellungen des Messbereichs und der Geräteempfindlichkeit einzustellen. Diese Werte hängen von den Eigenschaften der Oberfläche ab und sind individuell anzupassen. Das Gerät ist jetzt bereit und die Messung kann durch Drücken der Start-Taste gestartet werden. Eine Kalibrierung des Messkopfes ist im Normalfall nicht notwendig, die Längenskalen widerspiegeln die korrekten Masse.

Die Messung kann jeder Zeit durch Click auf Stop oder Withdraw beendet werden. Sollen Parameter verändert werden, ist die laufende Messung zu unterbrechen und neu zu starten. Ausnahmen bilden die Einstellungen für Gain und Offset im Parameter-Panel. Ist die Abbildung der Oberfläche befriedigend, können mit einem Auswertungs Plug-In Messungen vorgenommen werden. Mit der weisse Linie

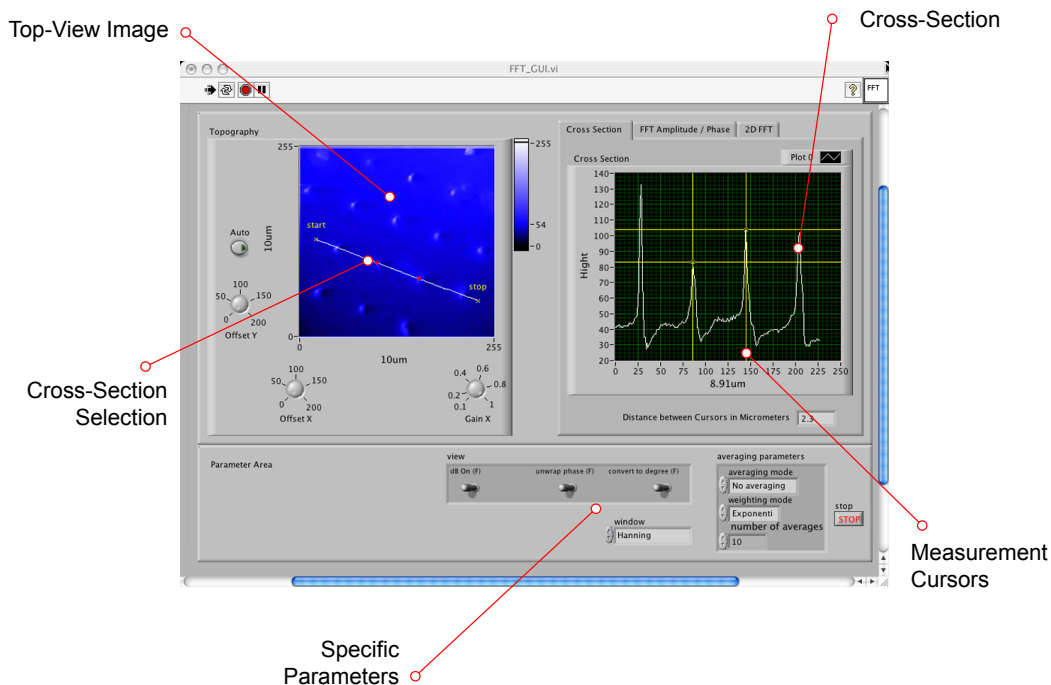


Abbildung C.9: Ein Plug-in zur Analyse der Messdaten. Mit diesem Filter Plug-In können Cross-Section Messungen vorgenommen werden.

in der Aufsichtsanzeige der Messwerte kann eine beliebige Cross-Section gewählt werden, die im Cross-Section Anzeigebereich dargestellt wird. Im Höhenprofil kann durch Verschieben der gelben Cursors ein Bereich ausgemessen werden. Die Distanz wird unterhalb der Anzeige als numerischer Wert dargestellt.

C.5 Einzelplatz Betrieb

Um das Gerät in einer Einzelplatz-Umgebung einzusetzen, wird im Normalfall die Standard Client-Application verwendet. Der einzige Unterschied liegt in der direkten Verbindung zum Geräteserver, ohne das Zwischenschalten des Commando-Broadcasters. Die kollaborativen Elemente der Client-Application

[vgl. Kapitel 3.3 und 3.4] sind zwar im Funktionsumfang enthalten, können aber nicht praktisch eingesetzt werden.

Durch den modularen Aufbau der Software [vgl. Kapitel 2.2.3], kann eine beliebige andere Steuerung programmiert werden. Der Einsatzbereich ist nahezu unbegrenzt.

C.6 Mehrbenutzer-Betrieb

Der Mehrplatzbetrieb unterscheidet sich vom Einzelplatzbetrieb nur durch einen erweiterten Funktionsumfang für die kollaborative Steuerung des Geräts. Diese kollaborative Steuerung folgt einem klaren didaktischen Konzept, dass in Kapitel 3.1 detailliert beschrieben wird. Die Funktionalität beinhaltet im wesentlichen:

Observer/Controller-Mode:

Durch Drücken der entsprechenden Tasten Observer und Controller im Status-Panel, kann die Software zwischen dem Modus des vollen Zugriffs und dem beschränkten Zugriff umgeschaltet werden. Eine rot oder grün leuchtende LED symbolisiert den entsprechenden Zustand. Rot heisst Observer, grün heisst Controller.

Beginner/Expert-Mode:

Um vom Beginner- auf den Expert-Mode umzuschalten, muss auf die Indexfelder der Karteikarten im Panel geklickt werden.

C.7 Problembehandlung

C.7.1 Der Geräteserver reagiert nicht mehr

Im Falle eines Absturzes oder eines undefinierten Zustandes kann das Gerät durch Unterbrechen der Stromversorgung und Wiedereinschalten neu gestartet werden. Wird nur die Stromversorgung der RAFM Mechanik aus- und eingeschaltet, muss auch der Geräte-Server neu gestartet werden. Alle notwendigen Schritte zur Wiederherstellung des normalen Betriebszustandes werden automatisch durchgeführt.

C.7.2 Die Robotik ist dejustiert

Ist die Positioniergenauigkeit unzureichend, kann durch das Kommando *command = calibratestage* die Robotik neu justiert werden. Sind trotzdem keine befriedigenden Positioniergenauigkeiten zu erzielen, muss das Gerät durch eine fachkundige Person gewartet werden.

C.7.3 Die Messungen sind nicht gut

Werden nur bedingt gute Messergebnisse erlangt, empfiehlt es sich, den Messkopf von der Probe abzuheben und neu zu approachen. Sind dennoch keine klaren Bilder zu erkennen, sollten alle Parameter auf Standardwerte gesetzt werden. Im besonderen gilt dies für x-tilt, y-til, die Offset- und Verstärkungswerte.

C.7.4 Ich kann nicht mit dem Geräteserver verbinden

Die Netzwerkeinstellungen aller beteiligter Computer sind zu überprüfen. Ist dennoch keine Verbindung möglich sind Einstellungen von Firewalls (Hard-, und Software) zu kontrollieren.

Weiterführende Informationen zum RAFM finden Sie unter: <http://www.nano-world.org>

D Kommando-Liste

Folgende Kommandos sind im System registriert:

command=start

Startet die Messung eines ganzen Bildes

command=stop

Stoppt die Messung eines Bildes

command=approach

Setzt die Messspitze autonom auf die Oberfläche. Ist die Messspitze approached kann die Position der Robotik nicht mehr verändert werden.

command=withdraw

Hebt die Messspitze von der Oberfläche ab. Bewegungen mit der Robotik sind wieder erlaubt.

command=videoa

Wählt die Seitenansicht des Video-Kanals

command=videob

Wählt die Aufsicht des Video-Kanals

Kommandos mit Parametern:

command=set name=SWGain value=0.01..1000

Definiert die Software-Verstärkung des Messsignals.

command=set name=SWOffset value=-1000..1000

Definiert den Software-Offset des Messsignals

command=set name=channel value=0..1

Schaltet zwischen dem Topografiesignal (0) und dem Reglerausgangssignal (1) um

command=set name=direction value=0..1

Schaltet die Scanrichtung von Vorwärts (0) nach Rückwärts (1) um

command=set name=xtilt value=-25..25

Korrigiert die Messeben mit x als Drehachse. Der Grad der Drehung ist abhängig vom Scanbereich.

command=set name=ytilt value=-25..25

Korrigiert die Messeben mit y als Drehachse. Der Grad der Drehung ist abhängig vom Scanbereich.

command=set name=scanrange value=0.1..100

Verändert den Messbereich der Abtastung [μm]

command=directset name=ATR.TimePerUnit value=100..50000

Einstellen der Abtastzeit pro Linie [$\frac{1}{2500}$ Sekunden]

command=directset name=ATR_RegSetPoint value=-100..1000
Definiert die Andruckkraft des Federbalkens [$\frac{1}{20}$ Nanonewton]

command=directset name=ATR_RegIConst value=0..30
I-Verstärkung des Reglers

command=directset name=ATR_RegPConst value=0..30
P-Verstärkung des Reglers

Für den Probenstisch sind folgende Kommandos definiert:

command=calibratestage
Rejustiert die Robotik

command=moveaxis name=x..a value=0..12000
Verändert die aktuelle Position mit automatischem Abheben des Sensors

command=adjustaxis name=x..a value=-500..500
Verändert die aktuelle Position relativ um die definierte Anzahl Schritte $0,8\mu m$ pro Schritt

command=goto0..4
Bewegt die Messspitze zur Probe mit der entsprechenden Nummer

E Mathematische Herleitungen

Die Fourier Komponenten einer beliebigen Funktion:

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{2}}^{-\frac{T}{2}} f(x) \cos(n\omega x) dx \quad (\text{E.1})$$

Mit den unterschiedlichen Bereichen für $f(x)$:

Abschnitt R_3 :

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{-x_1} A \cos(\omega x) \cos(n\omega x) dx \quad (\text{E.2})$$

Abschnitt R_2 :

$$+ \frac{1}{T} \int_{-x_1}^{-x_0} (mx + q) \cos(n\omega x) dx \quad (\text{E.3})$$

Abschnitt R_1 :

$$+ \frac{1}{T} \int_{-x_0}^{x_0} A \cos(\omega x) \cos(n\omega x) dx \quad (\text{E.4})$$

Abschnitt R'_2 :

$$+ \frac{1}{T} \int_{x_2}^{x_1} (-mx + q) \cos(n\omega x) dx \quad (\text{E.5})$$

Abschnitt R'_3 :

$$+ \frac{1}{T} \int_{x_1}^{\frac{T}{2}} A \cos(\omega x) \cos(n\omega x) dx \quad (\text{E.6})$$

Grenzpunkt x_0 :

$$y = A \cos(\omega x_0) \quad (\text{E.7})$$

$$y' = -a\omega \sin(\omega x_0) \quad (\text{E.8})$$

$$m = \pm A\omega \sin(\omega x_0) \quad (\text{E.9})$$

$$x_0 = \frac{\pm \arcsin\left(\frac{m}{A\omega}\right)}{\omega} \quad (\text{E.10})$$

Definition Form-Faktor:

$$C = \frac{m}{A\omega} \quad (\text{E.11})$$

Achsenabschnitt q:

$$q = A \cos(\omega x_0) + m x_0 \quad (\text{E.12})$$

$$q = A \cos(\arcsin(C)) + m x_0 \quad (\text{E.13})$$

$$q = A \sqrt{1 - C^2} + \frac{m}{\omega} \arcsin(C) \quad (\text{E.14})$$

$$q = A \left(\sqrt{1 - C^2} + C \arcsin(C) \right) \quad (\text{E.15})$$

Geometrische Bedingungen für Phasenübergang mit Grenzpunkt x_1 :

$$m = \frac{f\left(\frac{T}{2}\right) - f(x_0)}{\frac{T}{2} - x_0} = f'(x_0) \quad (\text{E.16})$$

$$\frac{-A - A \cos(\omega x)}{\frac{\pi}{\omega} - x} = -A \omega \sin(\omega x) \quad (\text{E.17})$$

$$1 + \cos(\omega x) = \left(\frac{\pi}{\omega} - x \right) \omega \sin(\omega x) \quad (\text{E.18})$$

$$u = \omega x \quad (\text{E.19})$$

$$1 + \cos(u) = (\pi - u) \omega \sin(u) \quad (\text{E.20})$$

$$\frac{1 - \cos(u)}{\sin(\pi - u)} = \pi - u \quad (\text{E.21})$$

$$y = \pi - u \quad (\text{E.22})$$

$$y \sin(y) + \cos(y) = 1 \quad (\text{E.23})$$

Lösung für $y = 2,33$ somit ist $C = 0,725!$

Grenzpunkt x_1 :

$$-m x_1 + q = A \cos(\omega x_1) \quad (\text{E.24})$$

$$-m x_1 + A \cos(\omega x_0) + m x_0 = A \cos(\omega x_1) \quad (\text{E.25})$$

$$u = \omega x_1 \quad (\text{E.26})$$

$$-\frac{m}{\omega} u + A \cos(\arcsin(C)) + \frac{m}{\omega} \arcsin(C) = A \cos(u) \quad (\text{E.27})$$

$$\cos(u) + C u = \sqrt{1 - C^2} + C \arcsin(C) \quad (\text{E.28})$$

$$(\text{E.29})$$

Die transzendente Form von x_1 erfordert eine numerische Lösung die den Wert π für $C=0,75$ und $\frac{\pi}{2}$ für $C=1$ bestätigt.

Die Lösung der Integrale für a_1 mit $0,75 < C < 1$:

$$a_1 = \frac{2}{T} \left(\int_{-x_0}^{x_0} A \cos^2(\omega x) dx + 2 \int_{x_0}^{\frac{T}{2}} (-mx + q) \cos(\omega x) dx \right) \quad (\text{E.30})$$

$$a_1 = \frac{\omega}{\pi} A \left(\int_{-x_0}^{x_0} \cos^2(\omega x) dx + 2 \int_{x_0}^{\frac{\pi}{\omega}} \left(-\frac{m}{A} x + \frac{q}{A} \right) \cos(\omega x) dx \right) \quad (\text{E.31})$$

$$a_1 = \frac{\omega A}{\pi} \left(\int_{-x_0}^{x_0} \cos^2(\omega x) dx + 2 \int_{x_0}^{\frac{\pi}{\omega}} (-C\omega x + q') \cos(\omega x) dx \right) \quad (\text{E.32})$$

Substitution für die weitere Lösung von a_1 für $0,75 < C < 1$:

$$u = \omega x \quad (\text{E.33})$$

$$\frac{du}{dx} = \omega \quad (\text{E.34})$$

$$dx = \frac{du}{\omega} \quad (\text{E.35})$$

$$a_1 = \frac{\omega A}{\pi \omega} \left(\int_{-\omega x_0}^{\omega x_0} \cos^2(u) du + 2 \int_{\omega x_0}^{\pi} (-Cu + q') \cos(u) du \right) \quad (\text{E.36})$$

$$a_1 = \frac{A}{\pi} \left(\int_{-\arcsin(C)}^{\arcsin(C)} \cos^2(u) du \right) \quad (\text{E.37})$$

$$+ 2 \int_{\arcsin(C)}^{\pi} \left(-Cu + C \arcsin(C) + \sqrt{1 - C^2} \right) \cos(u) du \quad (\text{E.38})$$

$$G(C) = \int_{-\arcsin(C)}^{\arcsin(C)} \cos^2(u) du \quad (\text{E.39})$$

$$+ 2 \int_{\arcsin(C)}^{\pi} \left(C(\arcsin(C) - u) + \sqrt{1 - C^2} \right) \cos(u) du \quad (\text{E.40})$$

Die Lösung des Integral für a_1 ergibt:

$$G(C) = \frac{2C + \sqrt{1 - C^2}C + \arcsin(C)}{\pi} \quad (\text{E.41})$$

Analog ergibt sich für a_0 im Falle $0,75 < C < 1$:

$$a_0 = \frac{2}{T} \left(\int_{-x_0}^{x_0} A \cos(\omega x) dx + 2 \int_{x_0}^{\frac{T}{2}} (-mx + q) \cos(\omega x) dx \right) \quad (\text{E.42})$$

$$a_1 = \frac{A}{\pi} \left(\int_{-\arcsin(C)}^{\arcsin(C)} \cos(u) du \quad (\text{E.43})$$

$$+ 2 \int_{\arcsin(C)}^{\pi} \left(-Cu + C \arcsin(C) + \sqrt{1 - C^2} \right) du \right) \quad (\text{E.44})$$

$$G(C) = \int_{-\arcsin(C)}^{\arcsin(C)} \cos(u) du \quad (\text{E.45})$$

$$+ 2 \int_{\arcsin(C)}^{\pi} \left(C (\arcsin(C) - u) + \sqrt{1 - C^2} \right) du \quad (\text{E.46})$$

Die Lösung des Integral für a_0 ergibt:

$$G(C) = \frac{-C (\pi^2 - \arcsin^2(C)) + 2C \arcsin(C) (\pi - \arcsin(C)) + 2\sqrt{1 - C^2} (\pi - \arcsin(C)) + 2C}{\pi} \quad (\text{E.47})$$

Daraus folgt die Frequenzabhängigkeit:

$$\frac{a_1}{A} = \frac{1}{\pi} G(C) \quad (\text{E.48})$$

Literaturverzeichnis

- [1] R. Berger, E. Delamarche, H.P. Lang, Ch. Gerber, J.K. Gimzewski, E. Meyer, and H.-J. Güntherodt. Surface Stress in the Self-Assembly of Alkanethiols on Gold Probed by a Force Microscopy Technique. *Appl. Phys. A*, 66:55, 1998.
- [2] M. de Wild, S. Berner, H. Suzuki, H. Yanagi, D. Schlettwein, S. Ivan, A. Baratoff, H.-J. Güntherodt, and T.A. Jung. A novel route to molecular self-assembly: Self-intermixed monolayer phases. *Chem-PhysChem*, 3(10):825, 2002.
- [3] R. Feynman. "there's plenty of room at the bottom", 1959. This talk given at the annual meeting of the American Physical Society at the California Institute of Technology was first published in the February 1960 issue of Caltech's *Engineering and Science*, which owns the copyright. It has been made available on the web at <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman.html> with their kind permission.
- [4] G. Binnig and H. Rohrer. Scanning tunneling microscopy. *Helv. Phys. Acta*, 55:726–735, 1982.
- [5] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, and E. Weibel. 7×7 reconstruction on si(111) resolved in real space. *Phys. Rev. Lett.*, 50(2):120–123, 1983.
- [6] G. Binnig, C.F. Quate, and Ch. Gerber. Atomic force microscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 56(9):930–933, 1986.
- [7] E. Meyer, H.J. Hug, and R. Bennewitz. *Scanning Probe Microscopy*. Springer-Verlag, Berlin, 2003.
- [8] Eds. R.J. Colton, A. Engel, J. Frommer, H.E. Gaub, A.A. Gewirth, R. Guckenberger, W.M. Heckl, B.A. Parkinson, and J.P. Rabe. *Procedures in Scanning Probe Microscopies*. John Wiley and Sons, Chichester-New York, 1998.
- [9] A. Bietsch, M.A. Schneider, M.E. Welland, and B. Michel. Electrical testing of gold nanostructures by conducting atomic force microscopy. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 18(3):1160, 2000.
- [10] G.P. Lopinski and R.A. Wolkow. Self-directed growth of molecular nanostructures on silicon. *Nature*, 406:48, 2000.
- [11] T. Jung, R.R. Schlittler, and J.K. Gimzewski. Conformational identification of individual adsorbed molecules with stm. *Nature*, 386:696, 1997.
- [12] J. Lü, M. Guggisberg, R. Lüthi, M. Kubon, L. Scandella, Ch. Gerber, E. Meyer, and H.-J. Güntherodt. Surface Potential Studies Using Kelvin Force Spectroscopy. *Appl. Phys. A*, 66:273, 1998.
- [13] C.M. Mate. Nanotribology of lubricated and unlubricated carbon overcoats on magnetic disks studied by friction force microscopy. *Surface and Coatings Technology*, 62:373, 1993.

- [14] U. Landman, W.D. Luedtke, and E.M. Ringer. In I.L. Singer and H.M. Pollock, editors, *Fundamentals of Friction*, page 463, Dordrecht, 1992. Kluwer Academic Press.
- [15] E. Meyer, R. Lüthi, L. Howald, and H.-J. Güntherodt. Friction Force Microscopy. In H.-J. Güntherodt et al., editor, *Forces in Scanning Probe Methods, NATO-ASI E*, volume 286, page 285, 1995.
- [16] T. Gyalog, M. Bammerlin, R. Lüthi, E. Meyer, and H. Thomas. Mechanism of Atomic Friction. *Europhys. Lett.*, 31:269, 1995.
- [17] R. Bennewitz, E. Gnecco, T. Gyalog, and E. Meyer. Atomic friction studies on well-defined surfaces. *Tribology Letters*, 10:51, 2001.
- [18] S. Polarz. Teaching with electronic collaborative learning groups. *J. Nanosci. Nanotech.*, 2(6)(4):581, December 2002.
- [19] K. Eric Drexler. *Nanotechnology: Research and Perspectives*. MIT Press: Cambridge, Massachusetts, 1992.
- [20] K. Eric Drexler. *Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation*. John Wiley and Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, and Singapore, 1995.
- [21] Ö. Abou Khaled, M. C. Pettenati, Y. A. Rwkik, and C. Vanoirbeek". Structuring documents for web based teaching. *CIDE*, 1998.
- [22] F. Flückiger and L. Müller, editors. *Towards Management of Life Long Learning using New Learning Technologies*, 1998.
- [23] P. Joye, editor. *TELELABORATORY: A Generic Approach to Distribute Protocol Measurements*, 28. March, 1998.
- [24] V. Trajkovic, editor. *Virtual Laboratory*, 2001.
- [25] J. Rugelj. *Computer-Supported Network-Based Learning Environment for the Workplace: Usability Evaluation of Online Learning Programs*. Information Science Publishing, 2003.
- [26] Swiss Virtual Campus. www.virtualcampus.ch, 2000-2004.
- [27] an virtual laboratory on nanoscience Nano-World. www.nano-world.org, 2000.
- [28] M. Guggisberg, P. Fornaro, T. Gyalog, and H. Burkhart. An interdisciplinary virtual laboratory on nanoscience. *Future Generation Computer Systems*, 19(1):133–144, 2003.
- [29] M. Guggisberg, P. Fornaro, A. Smith, T. Gyalog, C. Wattinger, and H. Burkhart. Collaborative nanoscience laboratory with intergrated learning modules. *CHIMIA*, 57(3):128, 2003.
- [30] C. Wattinger, P. Fornaro, M. Guggisberg, T. Gyalog, and H. Burkhart. Monitoring and controlling scientific experiments: Anywhere - anytime. *ERCIM News*, 52:13–15, 2003.
- [31] Interactive Nano-Visualization in Science IN-VSEE and Engeneering. invsee.asu.edu, 2000.
- [32] National Nanotechnology Initiative. Leading to the next industrial revolution (nni). *NSTC/IWGN*, 2000.

- [33] W. Liang, M.P. Shores, M. Bockrath, J.R. Long, and H. Park. Kondo resonance in a single-molecule transistors. *Nature*, 417:725, 2002.
- [34] P. Vettiger and M. Despont and U. Drechsler and U. Dürig and W. Häberle and M.I. Lutwyche and H.E. Rothuizen and R. Stutz and R. Widmer and G.K. Binnig. The millipede - more than one thousand tips for future afm data storage. *IBM J. Res. Dev.*, 44(3):323, 2000.
- [35] SWX Swiss Exchange. Das schweizerische kompetenznetz in der mikro- und nanotechnologie. www.swx.com/products/micronanotechnology.pdf, 2001.
- [36] Technologie Orientierte Programm NANO 21. <http://www.temas.ch/nano/nanohomepage.nsf>.
- [37] Nanosurf AG. www.nanosurf.ch.
- [38] Newfocus Instruments. www.newfocus.com.
- [39] nanotec GmbH. Germany, www.nanotec.com.
- [40] National Instruments. , www.ni.com.
- [41] Apple Quicktime Broadcaster. <http://www.apple.com/quicktime/products/broadcaster/>.
- [42] <http://www.apple.com/quicktime/products/qtss/>. <http://www.apple.com/qtss>.
- [43] E.R. Fahraeus, B. Chamberlain, V. Baykov, N. Bridgeman, R. Dumbraveanu, U. Fuller, and J. Rugelj. Teaching with electronic collaborative learning groups. *SIGCSE Bulletin*, 31(4):121–128, December 1999.
- [44] J. Rugelj. *Collaborative Virtual Environments For Problem Based Learning*. Ashgate, 2000.
- [45] T. Hansen, L. Dirckinck-Holmfeld, R. Lewis, and J. Rugelj. *Using telematics for collaborative knowledge construction, in Collaborative Learning: Cognitive and Computational Approaches*. Number 4. Elsevier Science, 1998.
- [46] F. Hesse, B. Garsoffky, and A. Hron. *Interface-Design für computerunterstütztes kooperatives Lernen*. Weinheim, 1997.
- [47] MicroMasch. www.micromasch.com.
- [48] NanoSensors. <http://www.nanosensors.com>.
- [49] Ü. Huebner, W. Morgenroth, S. Bormann, H.-G. Meyer, Th. Salzbach, and W. Mirandé”B. Brendel, editors. *Determination of the AFM tip-shape with well-known sharpedged calibration structures actual state and measuring results*, Proceedings of the EUSPEN Eindhoven, 2002.
- [50] K. F. Jarausch, T. J. Stark, and P. E. Russel. Silicon structures for in situ characterization of atomic force microscope probe geometry. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14(6):3425, 1996.
- [51] K. Wilder, C. F. Quate, B. Singh, R. Alvis, , and W. H. Arnold. Atomic force microscopy for cross section inspection and metrology. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14(6):4004, 1996.
- [52] M. Guggisberg, M. Bammerlin, Ch. Loppacher, O. Pfeiffer, A. Abdurixit, V. Barwich, R. Bennewitz, A. Baratoff, E. Meyer, and H.-J. Güntherodt. Separation of interactions by non-contact force microscopy. *Phys. Rev. B*, 61:11151, 2000.

- [53] M.A. Lantz, H.J. Hug, P.J.A. van Schendel, R. Hoffmann, S. Martin, A. Baratoff, A. Abdurixit, H.-J. Güntherodt, and Ch. Gerber. Low Temperature Scanning Force Microscopy of the Si(111)-(7x7) Surface. *Phys. Rev. Lett.*, 84(23):2642, 2000.
- [54] C.M. Mate. Nanotribology studies of carbon surfaces by force microscopy. *Wear*, 168:17, 1993.
- [55] E. Gnecco, R. Bennewitz, and E. Meyer. Abrasive wear on the atomic scale. *Phys. Rev. Lett.*, 88:215501, 2002.
- [56] E. Rabinowicz. *Friction and wear of materials*. John Wiley, New York, 1995.
- [57] G. Schitter, P. Menold, H.F. Knapp, F. Allgöwer, and A. Stemmer. High performance feedback for fast scanning atomic force microscopes. *Rev. Sci. Instr.*, 72(8):3320–3332, 2001.
- [58] J.G. Ziegler and N.B. Nichols. Optimum settings for automatic controllers. *Trans. ASME*, 64:759, 1942.
- [59] J.S. Villarrubia. Scanned probe microscope tip characterization without calibrated tip characterizers. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14:1518, 1996.