

Teilprojekt B1

1 Allgemeine Angaben

1.1 Thema

Beanspruchungsabhängige Veränderungen der Reibflächentopographie

1.2 Fachgebiete und Ausrichtung

Digitale Mikrophotogrammetrie, Digitale Bildanalyse

1.3 Leiter

Prof. Dr.-Ing. Jörg Albrecht

1.4 Wissenschaftliche Mitarbeiter

Dipl.-Ing. Matthias Hemmleb (von 01.07.1998 bis 31.05.2000)

Dipl.-Inform. Gerhard König

Dipl.-Ing. John Moré (seit 24.08.2000)

Dipl.-Ing. Albert Wiedemann (seit 01.12.1998)

2 Zielsetzung im Berichtszeitraum

Die Ermittlung der Topographie von Oberflächen im Mikrobereich ist eine wesentliche Voraussetzung für die Analyse und Interpretation von Reibphänomenen. Die Anwendung der Stereophotogrammetrie für die dreidimensionale meßtechnische Erfassung von Mikroobjekten bietet den Vorteil, berührungsfrei und über verschiedene Maßstäbe hinweg einsetzbar zu sein. Die Verbindung photogrammetrischer Methoden mit neuesten Methoden aus dem Bereich des Computersehens (Computer Vision) sollte die exakte und weitgehend automatische Vermessung von Oberflächen ermöglichen. Für die Aufnahme bietet sich wegen seiner hohen Auflösung und Schärfentiefe vor allem das Rasterelektronenmikroskop an. Die Auswertung sollte auf der Basis von flächenhaften Bildzuordnungsmethoden durchgeführt werden. Diese waren an die speziellen Bedingungen der rasterelektronenmikroskopischen Abbildung anzupassen. Außerdem sollten weitere Aufnahmesensoren auf ihre Eignung für derartige Aufgabenstellungen untersucht werden. Hierbei war vor allem an die Verwendung von Videokameras gedacht, da diese bei einer feststehenden Aufnahmekonfiguration Ergebnisse mit Echtzeit-Geschwindigkeit erwarten lassen.

Von großer Bedeutung für das Erkennen und Messen von geometrischen Veränderungen der Oberfläche (Change Detection) ist die Reproduzierbarkeit der Messungen. Dies setzt die Verwendung von Paßpunkten im Mikrobereich voraus. Zu diesem Zweck wurden Markierungsverfahren diskutiert, evaluiert und entwickelt, welche die Grundlage für die Erkennung und Verwendung von Mikropaßpunkten darstellen.

Der Integration unterschiedlicher Meßmethoden sollte eine zentrale Rolle bei der Bearbeitung des Projekts zukommen. Um die Topographie einer Oberfläche möglichst vollständig zu beschreiben, müssen die Ergebnisse der verschiedenen Meßverfahren sowohl geometrisch als auch datentechnisch miteinander verbunden werden. Insbesondere soll eine Brücke zwischen makroskopischen Meßverfahren (Tastschnittverfahren, Laserscansysteme) und nanoskopischen Meßverfahren (AFM) geschlagen werden. Die Anwendung der Photogrammetrie, insbesondere auf rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, sollte dazu in entscheidendem Maße beitragen.

Nicht zuletzt stellt die Visualisierung ein wichtiges Kriterium für die Verwendbarkeit und Qualität von Oberflächenmeßverfahren im Hinblick auf reibungstechnische Problemstellungen dar. Vor allem die Integration von Ergebnissen aus verschiedenen Meßverfahren über einen großen Maßstabsbereich erfordert bezüglich der Darstellung und Ausmessung eine völlig neue Qualität.

Als Fernziel soll in späteren Phasen des Projekts versucht werden, die gemessenen oder berechneten Topographiedaten verschiedener Sensoren, Maßstäbe und Zeiten

in einem Informationssystem zu integrieren. Eventuell können in diesem Informationssystem auch andere Datensätze eines Objekts, die einen Raumbezug aufweisen (z.B. Thermographiedaten oder chemische Analysen der Oberfläche) eingebunden werden. Auf dieser Basis kann eine raumbezogene Datenbank für verschiedene Materialklassen aufgebaut werden. In Verbindung mit entsprechenden Abfrage- und Visualisierungswerkzeugen stehen damit für die Interpretation von Reibphänomenen völlig neue Möglichkeiten offen.

3 Teilaufgabenberichte: Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

3.1 Einführung

Zur Beschreibung und Analyse von Reibphänomenen ist die dreidimensionale Erfassung der Oberflächengeometrie von grundsätzlicher Bedeutung. Nur mit ihrer Hilfe können Veränderungen der Oberfläche für die Interpretation durch die Fachdisziplinen oder die reale Verteilung von Asperiten für Modellrechnungen ermittelt werden. Die Vermessung muss dazu in verschiedenen Genauigkeitsstufen (Auflösungen) möglich sein. Da kein Messverfahren den vollständigen Bereich von Flächen mit mehreren Dezimetern Ausdehnung bis in den atomaren Bereich vollständig abdeckt, müssen verschiedene, sich ergänzende Methoden entwickelt und Werkzeuge zur Verknüpfung der Daten bereitgestellt werden.

Im Rahmen des Teilprojektes B1 wurden Methoden zur photogrammetrischen Auswertung von rasterelektronenmikroskopischen Bildern und von makrooptischen Video-Aufnahmen entwickelt.

3.2 Photogrammetrische Bestimmung der Oberflächentopographie mit REM

Im Bereich einer Auflösung von etwa 10 nm bis etwa 5 µm können Rasterelektronenmikroskope (REM) für die messtechnische Erfassung der Oberflächentopographie eingesetzt werden. Dazu ist die zu vermessende und für die REM-Aufnahme präparierte Probenoberfläche im euzentrischen Punkt des REM zu plazieren und um diesen zu kippen. Um dies zu ermöglichen, wurde bei der BAM im Rahmen des Teilprojekts B2 eine geeignete Arbeitsbühne mit einem elektronischen Steuerungssystem eingebaut.

Für die photogrammetrische Auswertung von Probenbildern ist die Kalibrierung des Aufnahmesystems wichtig, außerdem die Entwicklung von Software für die Zuord-

nung von Bildpunkten und für die anschließende geometrische Auswertung. Um die photogrammetrische Messtechnik für andere Nutzer verfügbar zu machen, ist die Schaffung einer konsistenten und vollständigen Prozesskette von der Kalibrierung des Systems über die räumliche Modellierung der Oberfläche bis zur Darstellung der Auswerteergebnisse erforderlich. Weiteres findet man unter /1/ und /3/. Sehr detailliert wird die photogrammetrische Bestimmung der Oberflächentopographie mit REM in der Dissertation Hemmleb /5/ beschrieben.

3.2.1 Kalibrierung des REM

Die Kalibrierung des REM erfordert ein geeignetes räumliches Kalibrierobjekt mit bekannten geometrischen Eigenschaften. Leider konnte kein hierfür geeigneter räumlich gegliederter Körper mit hochgenauen Daten beschafft werden. Deshalb wurde ein anderes Kalibrierverfahren entwickelt, das mit einem ebenen Gitter arbeitet, welches in kontrollierter Weise vertikal verschoben wird. Ein solches Kalibriergitter wurde bei verschiedenen Vergrößerungen (Abb. 1), unter verschiedenen Kippwinkeln sowie in mehreren Höheneinstellungen aufgenommen. Da die Höhenänderungen mit genügender Genauigkeit gemessen werden konnten, wird mit den so gewonnenen Bildfolgen ein räumliches Kalibrierobjekt simuliert.

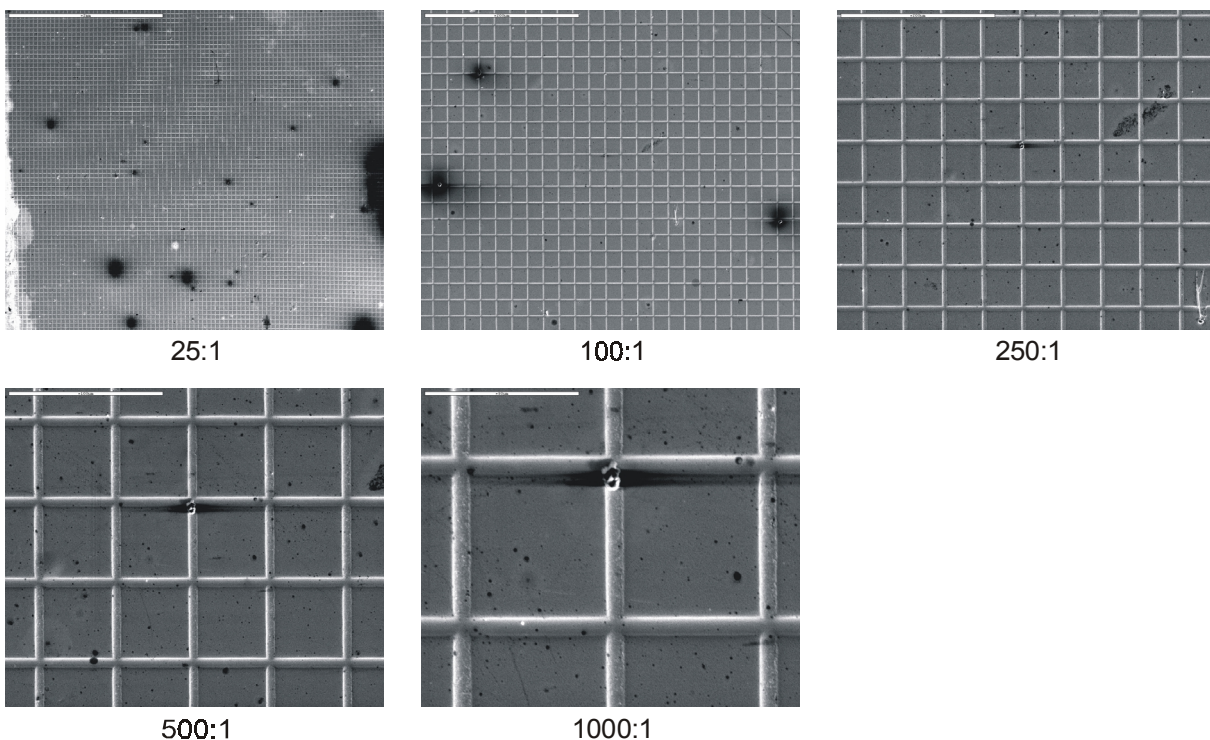


Abb.1: Kalibriergitter in verschiedenen Vergrößerungen (Gitterkonstante 19,61 Linien / mm)

Anschließend wurden die Bildkoordinaten der Gitterkreuze in den aufgezeichneten digitalen Bilddaten interaktiv gemessen. Die gewonnenen Messwerte wurden zusammen mit den Angaben aus dem Kalibrierprotokoll des Gitters in eine Berechnung eingeführt, in der für die verschiedenen Vergrößerungseinstellungen jeweils die Kamerakonstante der REM-Abbildung bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Eingestellte Vergrößerung am REM	Berechnete Kamera- konstante	Standardabweichung der Kamerakonstanten
25:1	8993 Pixel	88 Pixel
100:1	36527 Pixel	1886 Pixel
250:1	76752 Pixel	5327 Pixel

Tab.1: Kamerakonstanten des REM an der BAM in Pixel-Einheiten

Für die Auswertung weitgehend ebener Oberflächen können diese Werte als feste Größen in die Bündelblockausgleichung eingehen. Alle weiteren Kalibrierungsdaten können im Rahmen von Simultankalibrierungen bei der Bündelblockausgleichung bestimmt werden.

3.2.2 Untersuchung flächenhafter Bildzuordnungsalgorithmen

Die photogrammetrische Auswertung erfordert die Bestimmung von einander zugeordneten (homologen) Punkten in zwei oder mehr Bildern. Zu diesem Zweck wurden unterschiedliche Verfahren für die flächenbasierte Punktzuordnung (Matching) implementiert, anhand von Proben aus anderen Teilprojekten getestet und bewertet.

Auf Grund der Evaluierungsergebnisse wurde eine Vorgehensweise als die für die Zwecke des Sonderforschungsbereichs am besten geeignete ausgewählt und auch in die Auswerte-Software integriert: Zunächst werden homologe Punkte in einer festen Rasterweite mittels der Produktmomentenkorrelation (PMK) ermittelt. Diejenigen Punkte, deren Korrelationskoeffizienten einen frei wählbaren Schwellwert überschreiten, gehen als Näherungswerte in die anschließende Kleinste-Quadrate-Korrelation (KQK) ein. Auch deren Ergebnisse werden hinsichtlich der erreichten Qualität gefiltert. Anhand der Erfolgsquote der KQK bei der vorgegebenen Rasterweite können dann die für jede Probe individuell zu bestimmenden optimalen Parameter empirisch ermittelt werden. Es werden Erfolgsquoten zwischen 50% und 100% erwartet. Die wichtigsten Parameter sind dabei:

- Größe der Mustermatrix für die PMK
- Größe des Suchbereichs in Zeilen- und Spaltenrichtung bei der PMK
- Minimaler zulässiger Korrelationskoeffizient
- Größe der Mustermatrix für die KQK
- Größe des Suchbereichs in Zeilen- und Spaltenrichtung bei der KQK
- Zulässiger Punktlagefehler nach der KQK

Mit den optimalen Parametern wird schließlich ein endgültiger Rechengang mit einer Rasterweite von einem Pixel durchgeführt. Damit lässt sich die höchste mögliche Punktdichte für die Bestimmung des Digitalen Oberflächenmodells erzielen.

In Bereichen ohne Textur sind automatische Punktzuordnungsverfahren nicht anwendbar. Kleine Bereiche ohne Textur können durch Interpolation des DOM überbrückt werden. Probleme bestehen entlang von sehr steilen Flanken, Bruchkanten und in sichttoten Bereichen. In Abhängigkeit vom Objekt und der Aufgabenstellung müssen dort geeignete Verfahren zur Höheninterpolation interaktiv ausgewählt und eingesetzt werden.

3.2.3 Entwicklung einer Auswerte-Software für Aufgaben REM-Aufnahmen

Im Rahmen des Projekts wurde eine Auswerte-Software entwickelt und auch dem Teilprojekt B2 zur Verfügung gestellt, die die dreidimensionale Auswertung von Stereobildpaaren des REM ermöglicht. Die Anwendung dieser Software setzt voraus, dass die Bilder unter Beachtung photogrammetrischer Gesichtspunkte erstellt wurden. Die Erfahrungen aus den umfangreichen praktischen Untersuchungen zur Bildzuordnung (Matching) sind in das Programm eingeflossen. Das Programm REMmodel (Abb. 3) liegt jetzt in der Version 1.5 vor.

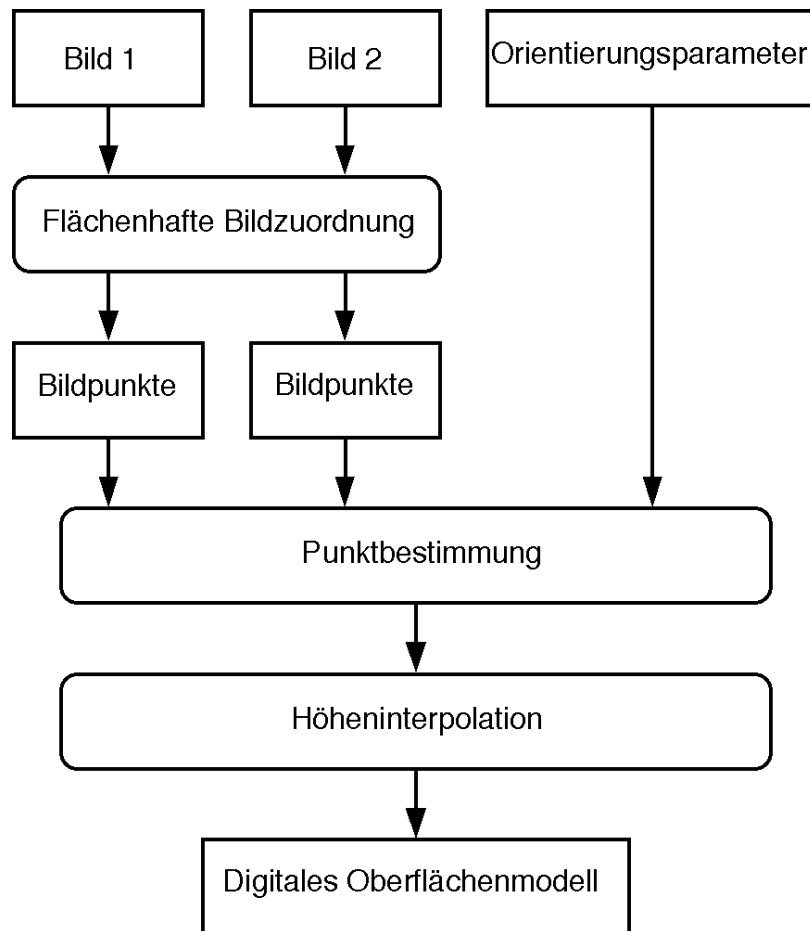


Abb. 2: Vorgehensweise bei der Erstellung digitaler Oberflächenmodelle aus REM-Bildern

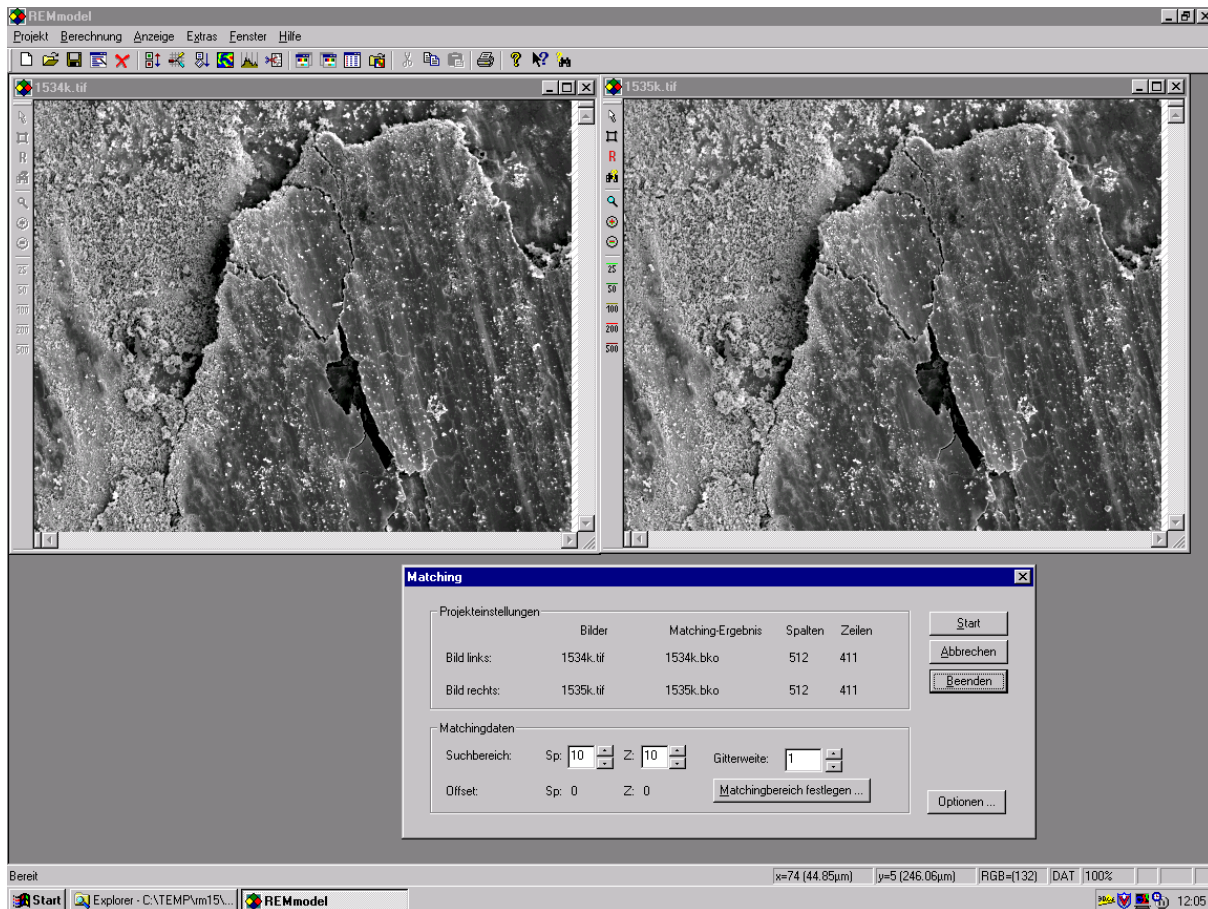


Abb. 3: Die Benutzeroberfläche des Programms REMmodel

Mit dem Programm REMmodel liegt somit eine geeignete Software vor, welche es einem eingewiesenen Nutzer erlaubt, auf einem PC aus REM-Bildern digitale Oberflächenmodelle herzuleiten.

3.3 Photogrammetrische Bestimmung der Oberflächentopographie mit einem CCD-Aufnahmesystem

Um den Maßstabsbereich bei der Gewinnung von Topographiedaten zu erweitern, werden auch CCD-Kameras für die Bildaufnahme genutzt /2/ /6/.

3.3.1 Aufbau und Kalibrierung eines photogrammetrischen CCD-Aufnahmesystems

Es wurde ein CCD - Bildaufnahmesystem eingerichtet, dessen Hauptkomponenten aus zwei CCD- Videokameras mit Normal- bzw. Makroobjektiven, einer besonderen Lichtquelle und einer Linearführung besteht (Abb.4). Um geeignete Beleuchtungsverhältnisse zu erzielen wurde eine Kaltlichtquelle mit zwei schwenkbaren Lichtaustritten und eine einfache Bürolampe verwendet. Diese Einrichtung erlaubt die

diffuse Ausleuchtung des Objektraumes mit Hilfe eines einfachen Reflektors oder durch geschickte Anordnung der Beleuchtungselemente.

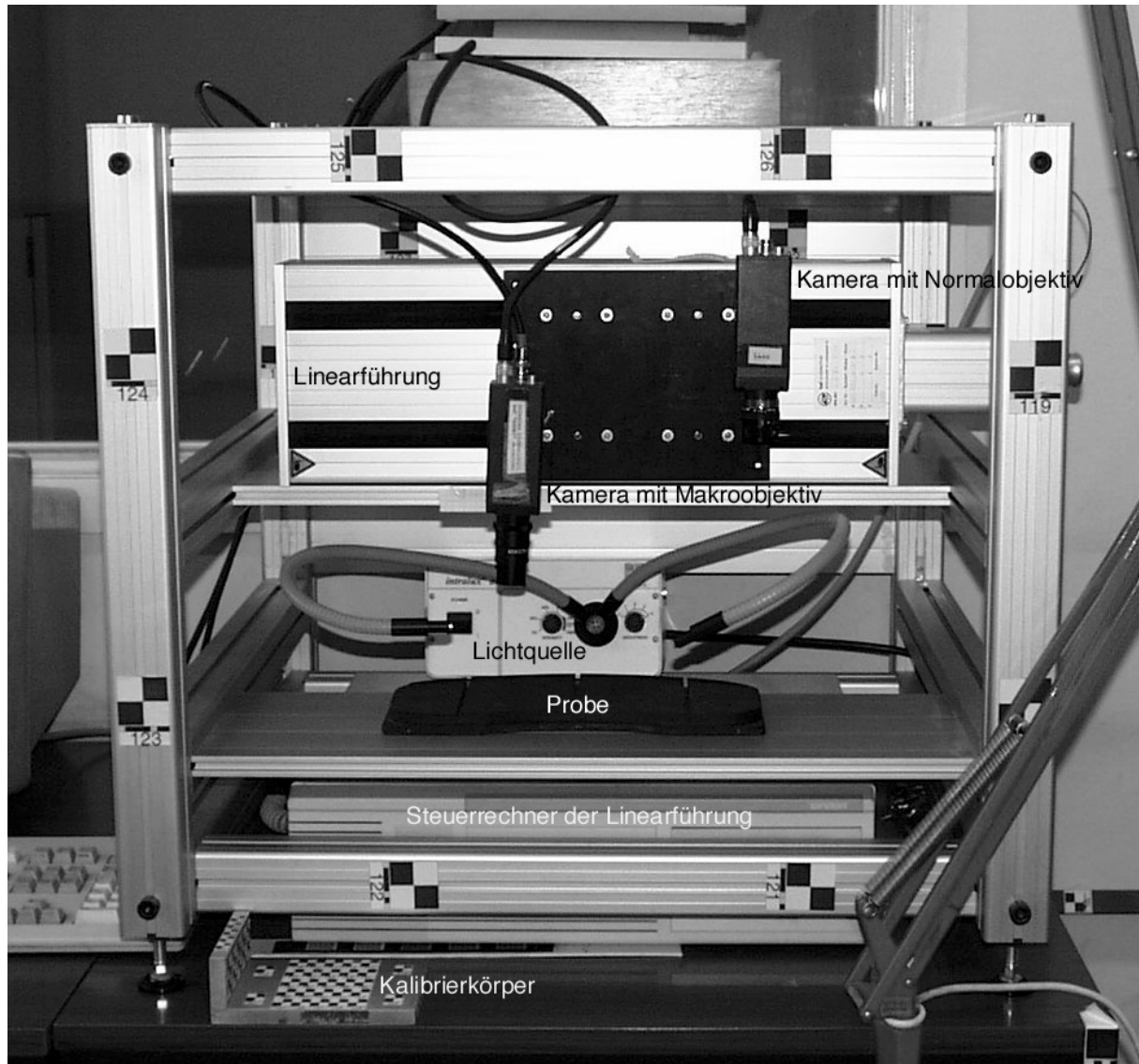


Abb.4: CCD-Bildaufnahmesystem

Zur stabilen Befestigung von Kameras und Proben wurde ein Rahmen aufgebaut, der das System zu einer Bildaufnahmestation vervollständigt. Beide Kameras sind auf der Linearführung fest montiert, wobei die Aufnahmerichtung nach unten zeigt und die Verschiebung der Kamera nahezu parallel zum Objektträger verläuft.

Die Kameras sind an einen Framegrabber angeschlossen, der in einem Rechner eingebaut ist.

Ein weiterer Rechner ist für die Steuerung der Linearführung nötig, da softwaretechnisch beide Systeme nicht gleichzeitig ausführbar sind (ein neues Steuerprogramm ist seitens des Herstellers für 2001 angekündigt).

Neben der mit einem Normalobjektiv ausgerüsteten Kamera wurde die zweite Kamera mit einem Makroobjektiv bestückt, um die Aufnahme von Bilddaten in möglichst großem Maßstab zu ermöglichen.

Das Makroobjektiv erlaubt die Abbildung der Oberfläche auf den CCD- Chip etwa 1:2 fach verkleinert. Somit wird auf den etwa 11 μm großen Bildelementen des Chips jeweils ein etwa 20 μm großer Ausschnitt aus dem Objektraum wiedergegeben (Tab. 2)

Konvergentaufnahmen sind mit dem Makroobjektiv nicht möglich. Der Schärfentiefebereich reicht nämlich nicht aus, um bei der zwangsläufig schrägen Sicht auf die Probenoberfläche Scharfabbildung zu erreichen. Daher wurde der ursprünglich geplante Aufbau mit zwei Kameras mit gleichen Objektiven zur Realisierung der Konvergentaufnahmen verworfen und je eine Kamera mit einer Optik versehen. Mit der Linearführung werden die Kameras rechnergesteuert um definierte Beträge bewegt. Die für die Stereophotogrammetrie erforderlichen Parallaxen entstehen hier also nicht durch Kippung des Objekts wie beim REM und auch nicht durch zwei konvergente Aufnahmen, sondern durch eine Relativbewegung zwischen Kamera und Objekt (entsprechend der Aufnahme in der Luftbildphotogrammetrie). Somit stehen mit dem CCD- Aufnahmesystem zwei Arbeitsmaßstäbe zur Verfügung:

Optik	Kamerakonstante	Pixelgröße im Objektraum	Aufnahmebereich
Makroobjektiv	5182 Pixel	$\approx 20 \mu\text{m}$	15 mm $\times$ 10 mm
Normalobjektiv	1454 Pixel	$\geq 200 \mu\text{m}$	$\geq 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$

Tab. 2: CCD-Aufnahmegeometrie

Das Aufnahmesystem wurde mit beiden Objektivtypen kalibriert. Während die Kamera mit dem Normalobjektiv mit einem räumlichen Kalibrierkörper kalibriert wurde, musste die innere Geometrie der Kamera mit dem Makroobjektiv durch ihren geringen Schärfentiefebereich mit einem ebenen Gitter, wie bei der Kalibrierung des REM, bestimmt werden. Das Aufnahmesystem wurde hierfür so umgebaut, dass das Gitter mit der Linearführung entlang der Aufnahme-richtung auf 10 μm genau verschoben wurde, und somit ein virtuelles räumliches Objekt entstand.

Die Messungen der Bildkoordinaten für die Kalibrierungsberechnungen erfolgte teil interaktiv mit dem selbst erstellten Programm IMDIS, halb-automatisch (ebenfalls mit IMDIS) oder vollautomatisch mit TARGSCAN /7/.

Bei den Versuchen zur Kalibrierung mittels kommerzieller Software stellte sich heraus, dass von keinem der vorliegenden Programme alle zu berücksichtigenden

Faktoren, Vorgaben und Bedingungen in einer Gesamtlösung behandelt werden konnten. Deshalb wurde ausschließlich selbst entwickelte Software eingesetzt /8/.

Wesentlich bei der Kalibrierung sind die unterschiedlichen geometrischen Modelle für die Fehlerfunktionen der Kameras. Nach eingehenden Untersuchungen nach ihrer Bedeutung wurden folgende maximalen Bildfehler ermittelt:

Bildfehler	Maximaler Einfluss Normalobjektiv	Maximaler Einfluss Makroobjektiv
Affinität	ca. 4,6 %	ca. 4,6 %
Scherung	< 0,1 %	< 0,1 %
Radiale Verzeichnung	ca. 0,13 %	< 0,1 %
Tangentiale Verzeichnung	< 0,1 %	< 0,1 %

Tab. 3: Bildfehler

Auffällig ist der Bildfehler der Affinität, der im Vergleich zu den anderen Einflüssen sehr stark überwiegt. Er entsteht bei der Umwandlung des analogen Videosignals, das vom Framegrabber aufgenommen und mit der vorgegebenen Videoauflösung von 768x574 Pixel digitalisiert wird. Da es keinen digitalen Ausgang dieser Videokameras gibt, kann man diesen Fehler nur rechnerisch kompensieren. Dies geschieht durch Bestimmung des Korrekturfaktors bei der Bündelblockausgleichung und durch Berücksichtigung des so bestimmten Wertes während der Berechnung des räumlichen Vorwärtsschnitts.

3.3.2 Untersuchung zur Bestimmung der Oberflächentopographie mit einem photogrammetrischen CCD- Aufnahmesystem

Die photogrammetrische Auswertung der CCD- Bilddaten folgt im Prinzip derselben Messstrategie wie bei den Bildern aus Rasterelektronenmikroskopen. Wichtig war auch hier die Schaffung einer durchgehenden Prozesskette aus einzelnen modularen Programmen, welche der Kalibrierung im Rahmen einer Bündelblockausgleichung, der Bestimmung von homologen Bildpunkten durch Punktzuordnung (Matching) (Abb. 8), der Berechnung von Oberflächenpunkten durch Vorwärtsschnitte und der Ableitung eines Digitalen Oberflächenmodells (DOM) dienen. Ein Teil der Erfahrungen mit den REM- Bilddaten können deshalb auf die mit CCD-Kameras gewonnenen Bilddaten übertragen werden.

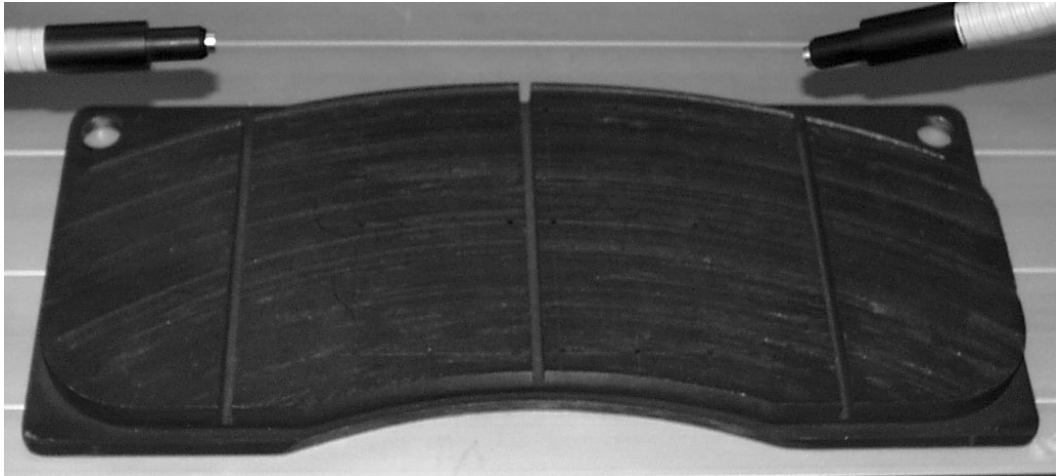


Abb. 5: Großes exemplarisches Objekt

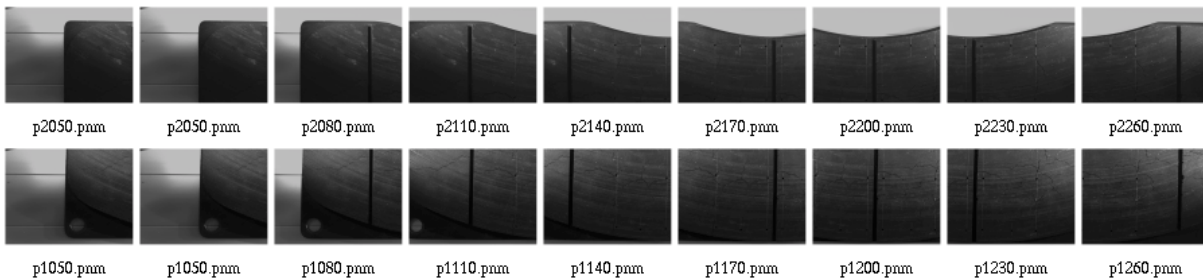


Abb. 6: Bildverband aus 18 Bildern mit dem Normalobjektiv

Bereiche größer als der Abbildungsbereich eines Objektivs können durch Aufnahme von Bildverbänden wie in der Luftbildphotogrammetrie abgedeckt werden (Abb.5 und Abb. 6).

Hinsichtlich der Aufnahmetechnik mussten dagegen einige Besonderheiten berücksichtigt werden. Probleme bereitete es zunächst, für die Abbildung eine ausgewogene und diffuse Beleuchtung zu erzielen. Deshalb wurden die ersten Untersuchungen anhand diffus reflektierender Oberflächen durchgeführt. Durch die Verwendung mehrerer Lichtquellen sowie die Ausleuchtung von drei Seiten in einem extrem flachen Winkel konnte die Aufgabe befriedigend gelöst werden.

Auf die Scharfabbildungsproblematik bei Makroobjektiven wurde bereits hingewiesen. Bei der gewählten Aufnahmeanordnung mit kontrollierter Relativbewegung der Kamera war in dem Schärfentiefebereich von ca. 1 mm die Bildpunktzuordnung (Matching) weitgehend problemlos möglich, so dass auch sämtliche Berechnungen durchgeführt werden konnten. Nur beim Verlassen des Schärfentiefebereichs (beispielsweise in tieferen Bohrungen) gab es Probleme bei der Bildzuordnung. Außerdem traten in den sehr engen Kanälen der Probe auf Grund der Oberflächen-

und Aufnahmegeometrie Unstetigkeitsstellen auf. Deshalb konnten diese Bereiche nicht genau erfasst werden. Es entstanden Lücken im Modell die auch mit verschiedenen Interpolationsansätzen nicht sauber geschlossen werden konnten. Diese Lücken sind mit 1) gekennzeichnet (Abb. 8, 9 und 10)

Zur Berechnung der Kalibrierung, der Vorwärtsschnitte und der Interpolation per *Nearest Neighbour* des DOM wurde eigene Software verwendet, zur Bildzuordnung (Matching) auch hier das Programm REMmodel. Die Visualisierung des DOM (Abb. 10) erfolgte mit kommerzieller Software (Surfer).

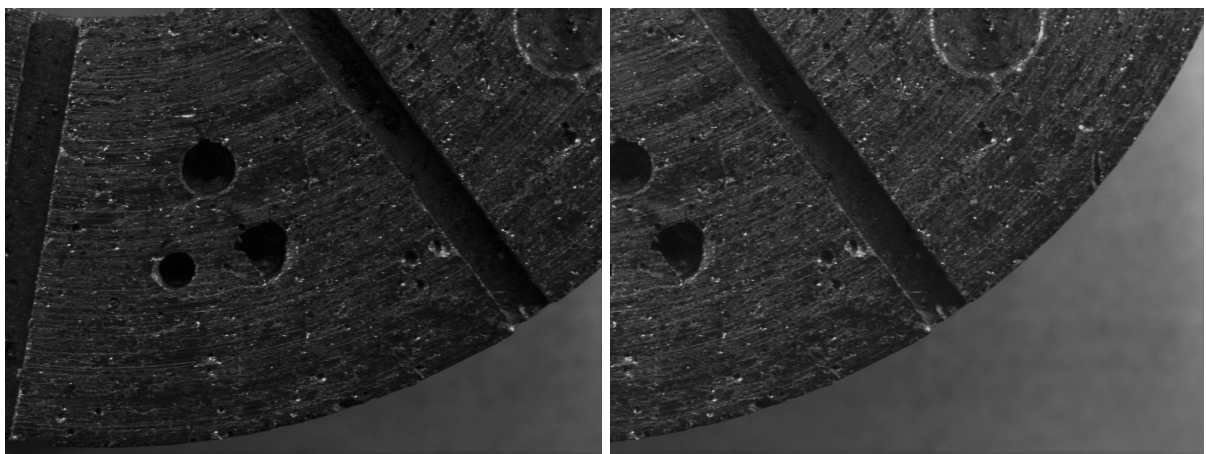


Abb. 7: Bildpaar mit dem Makroobjektiv

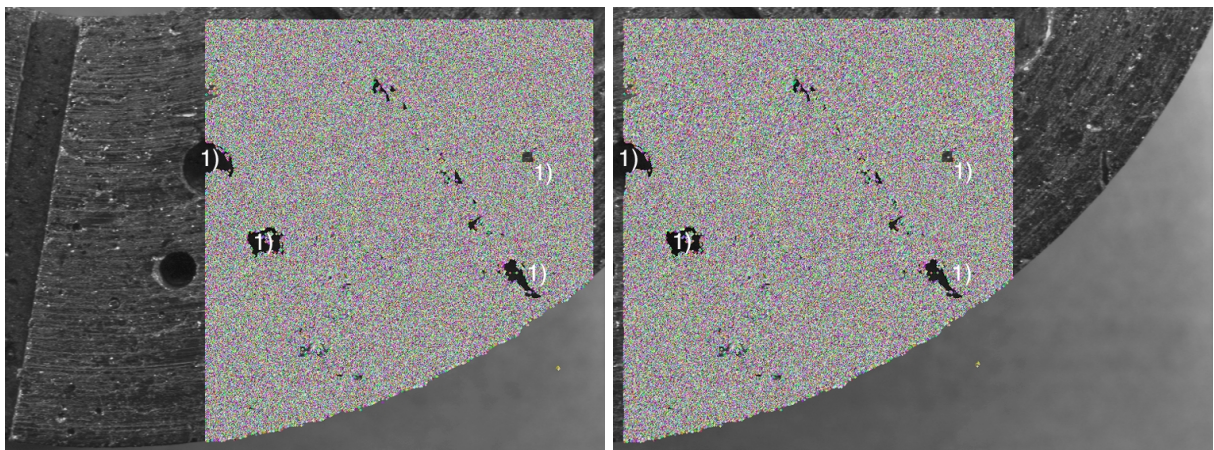


Abb. 8: Matching-Ergebnis: Die farblich codierten Punkte repräsentieren die jeweiligen Punktzuordnungen in beiden Bildern

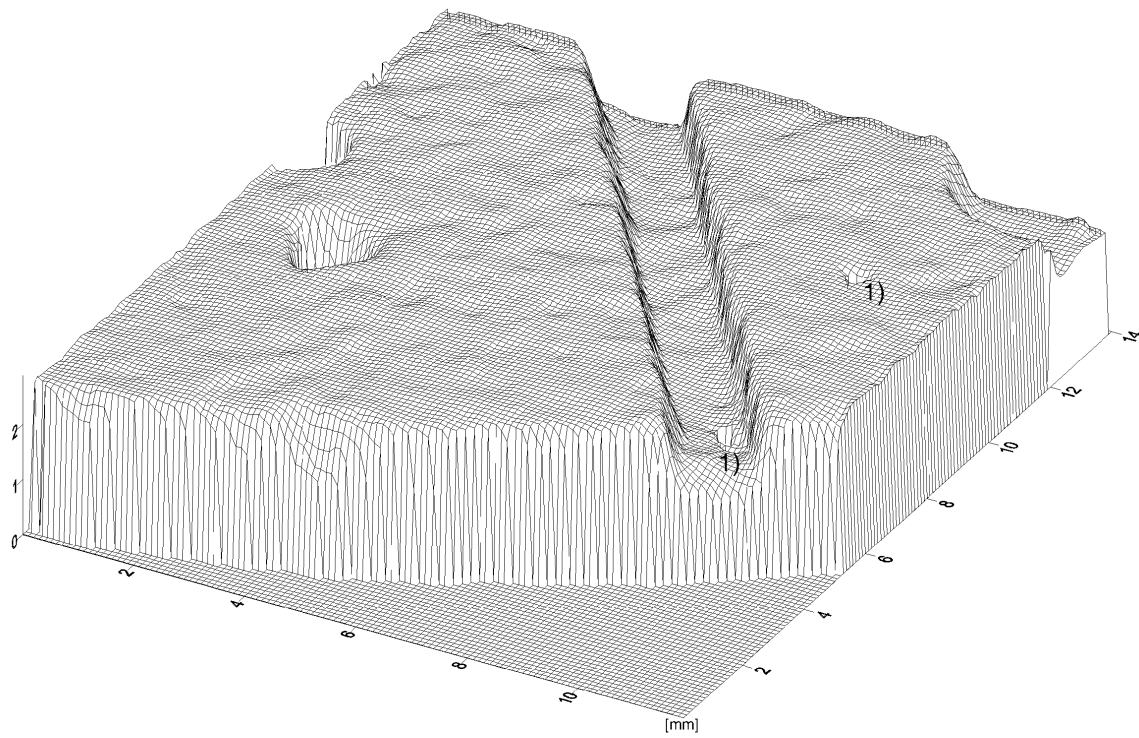


Abb. 9: Abgeleitetes Oberflächenmodell als Drahtmodell

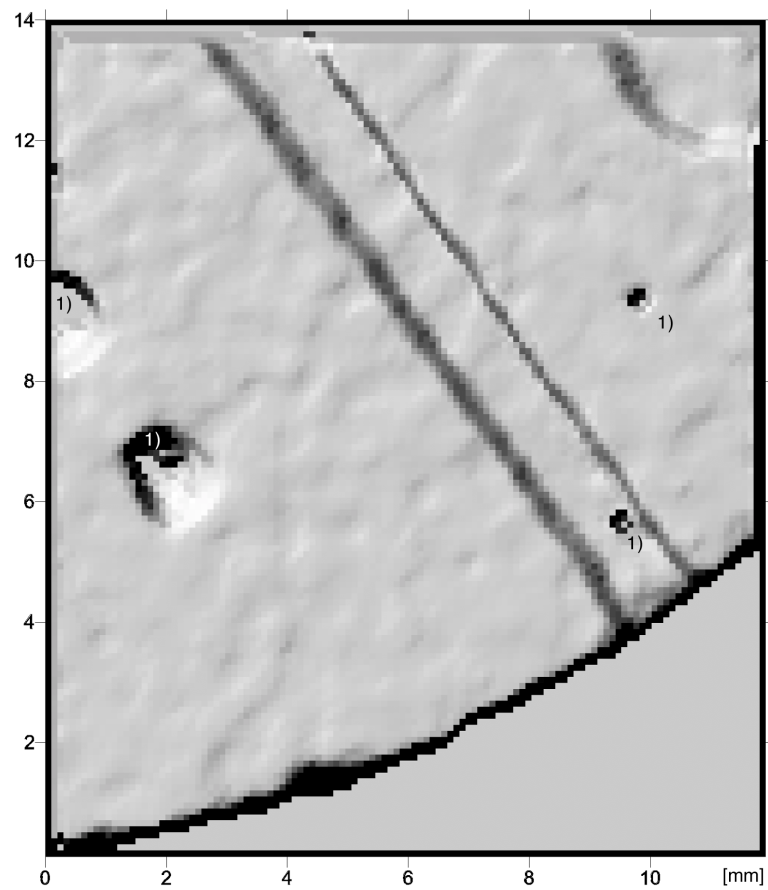


Abb. 10: Abgeleitetes Oberflächenmodell als Reliefdarstellung

3.4 Untersuchung von Veränderungen der Oberflächentopographie

Um die durch Reibvorgänge verursachten Veränderungen der Oberflächentopographie messtechnisch zu erfassen, müssen die Oberflächen vor und nach dem Ereignis miteinander verglichen werden. Dies setzt voraus, dass sie auf ein gemeinsames geometrisches Referenzsystem bezogen werden. Die klassische Lösung für ein solches Messproblem (z.B. Geländeerosion) ist es, gewonnene Oberflächenmodelle mit Hilfe unveränderter Passpunkte in ein gemeinsames Koordinatensystem zu transformieren.

Im vorliegenden Fall kommen Markierungen an der Reiboberfläche praktisch nicht infrage, da sie bei den heftigen Reibbelastungen entweder vollständig zerstört oder zumindest stark beeinträchtigt würden. Deshalb ist es erforderlich, ein geometrisches Bezugssystem durch Markierungen außerhalb des von der Reibung beanspruchten Bereiches zu definieren. Dies geschieht am besten, indem man die erforderlichen Markierungen in tiefere, von den Reibvorgängen unbeeinflusste Regionen verlegt. Da zur Bildaufnahme und -auswertung aber ein Einblick in die Vertiefungen erforderlich ist und die Schärfentiefengrenzen nicht überschritten werden dürfen, sollten Flächen zur Bestimmung von Referenzpunkten auch nicht zu tief sein. Bruchkanten an den Grenzen von Vertiefungen sind zur Definition des Bezugssystems ungeeignet, da sich ihre Gestalt während der Reibvorgänge stark verändert.

3.4.1 Untersuchung von Markierungsverfahren

Zur Schaffung von Referenzpunkten bzw. -flächen hat sich das Einschneiden oder Einfräsen rillenartiger Vertiefungen bewährt (Abb. 12). Sie erlauben das Auffinden von identischen Punkten vor und nach den Reibvorgängen in ausreichender Zahl und Qualität. Bisher erfolgt die Auswahl geeigneter Punkte interaktiv, wobei die Messungen zur Steigerung der Genauigkeit mit KQK verfeinert werden.

Dazu können »natürliche« Oberflächenstrukturen dienen, so dass die Verwendung spezieller Verfahren zur Markierung einzelner Punkte hinfällig wird. Das Tiefen-Breiten-Verhältnis der Nuten sollte kleiner eins sein, damit geometrische Verdeckungen nur in geringem Maße auftreten und sich eine ausreichende Zahl und Verteilung der Punkte für die räumliche Koordinatentransformation finden lässt.

3.4.2 Zuordnung und Transformation von 3D-Datensätzen

Die Bestimmung von Oberflächenveränderungen kann dann nach dem in Abb. 11 gezeigten Verfahrensablauf geschehen. Dabei ist davon auszugehen, dass das Oberflächenmodell des Zustands A (vor dem Reibereignis) und des Zustandes B (nach dem Reibereignis) aus den entsprechenden Bildern direkt ermittelt werden kann (DOM A und DOM B).

Anschließend werden in der Vertiefung identische Punkte in jeweils einem Bild jeder Epoche durch visuelle Interpretation ausgewählt und deren Bildkoordinaten manuell interaktiv gemessen (in Abb. 11 als Bilder 2 bezeichnet). Zur Steigerung der Genauigkeit kann zusätzlich ein automatisches Punktzuordnungsverfahren eingesetzt werden. Für die so in jeweils einem Bild definierten Punkte werden die homologen Punkte in den zugehörigen Bildern (hier als Bilder 1 bezeichnet) durch automatische Zuordnung gesucht. Unter Zuhilfenahme der bekannten Orientierungsdaten werden dann die 3D-Objektkoordinaten dieser Punkte jeder Epoche durch Vorwärtsschnitte berechnet. Das Ergebnis sind die paarweisen Raumkoordinaten derselben Objektpunkte der Epochen A und B, die damit als Passpunkte dienen können.

Anschließend können die Parameter einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation berechnet werden, mit der die 3D-Punkte der Epoche nach dem Reibereignis (DOM B) auf die Punkte vor dem Reibereignis (DOM A) eingepasst werden können. Dort wird dann erneut ein Oberflächenmodell berechnet, welches exakt die gleiche Lagegeometrie wie das DOM A der ersten Epoche hat. Daraus können die Veränderungen der Oberflächentopographie als Differenz der Punkthöhen direkt abgeleitet werden. Das Ergebnis eines solchen Vorgangs ist als Differenz-DOM, in Abb. 15 und 16 dargestellt.

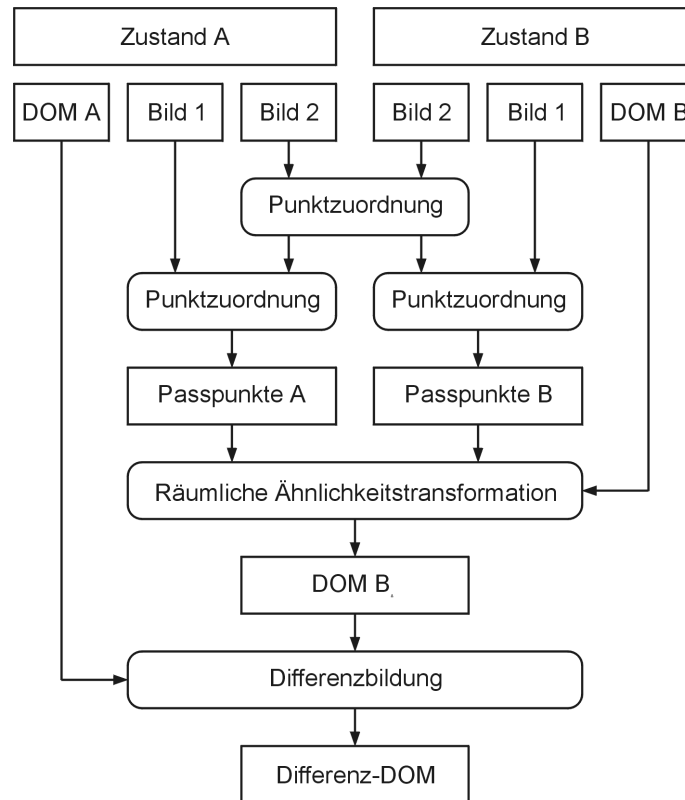


Abb. 11: Vorgehensweise zur Bestimmung von Oberflächenveränderungen

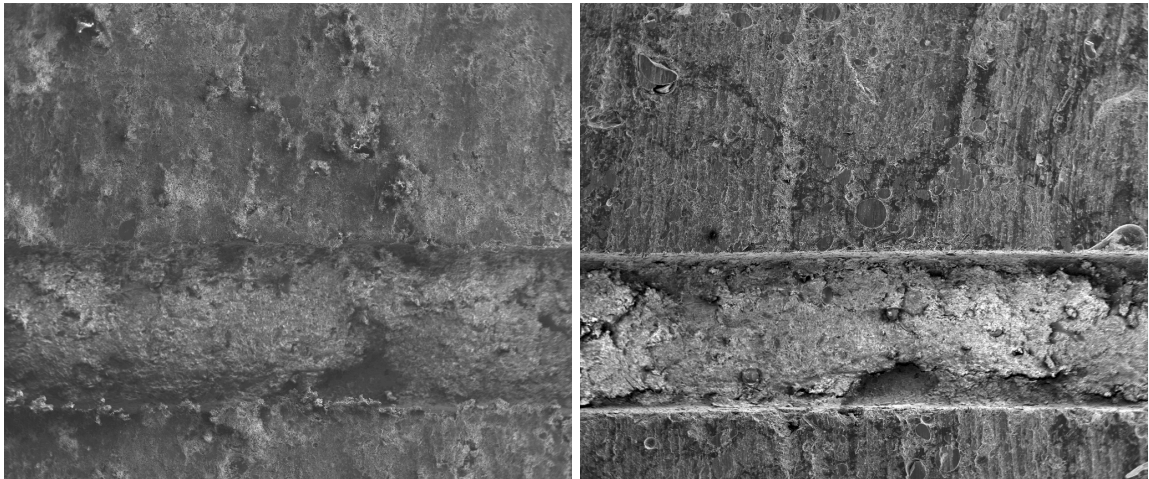


Abb. 12: REM-Aufnahmen einer Reibprobe, links vor der Belastung, rechts: nach der Belastung (Vergrößerung 25:1)

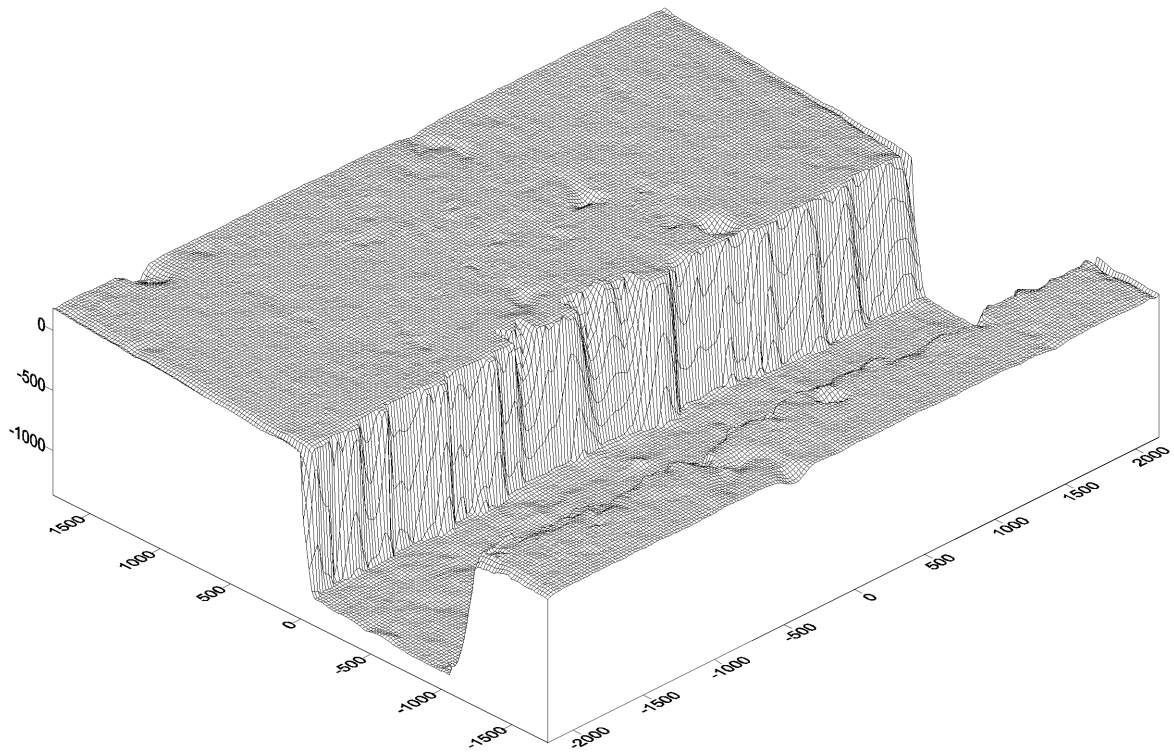


Abb. 13: DOM der in der Abb. 12 gezeigten Probe vor dem Reibereignis (Maße in μm)

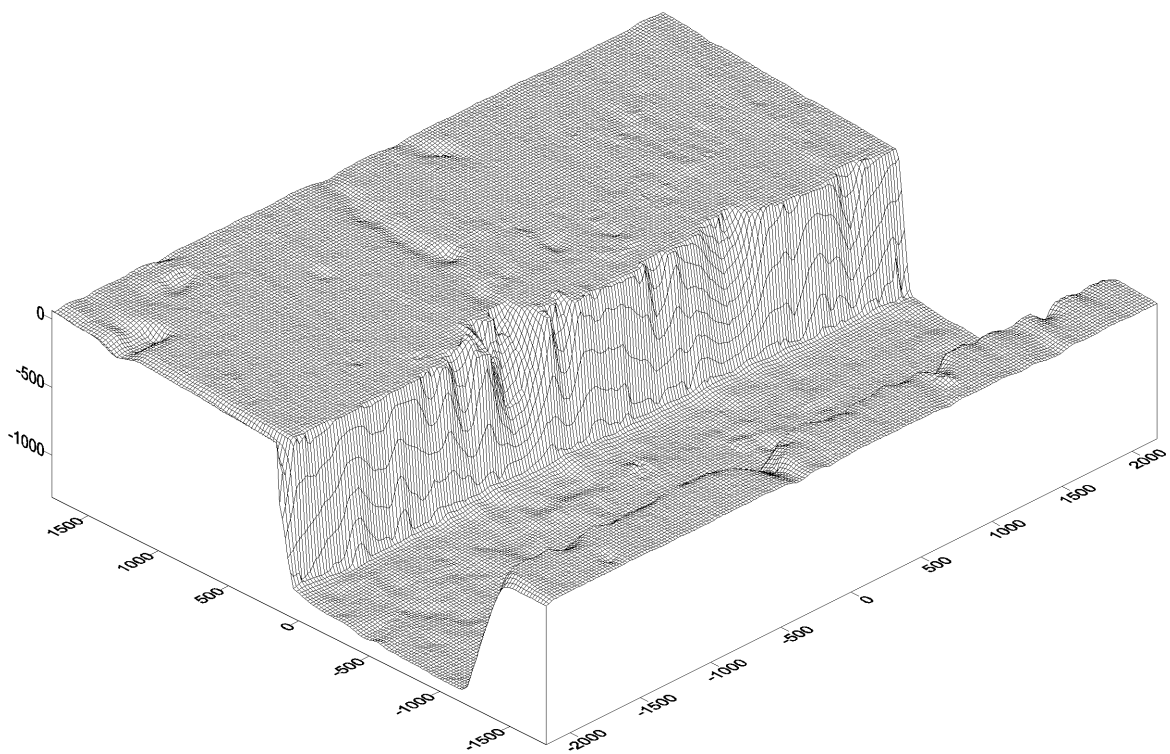


Abb. 14: DOM der in der Abb. 12 gezeigten Probe nach dem Reibereignis (Maße in μm)

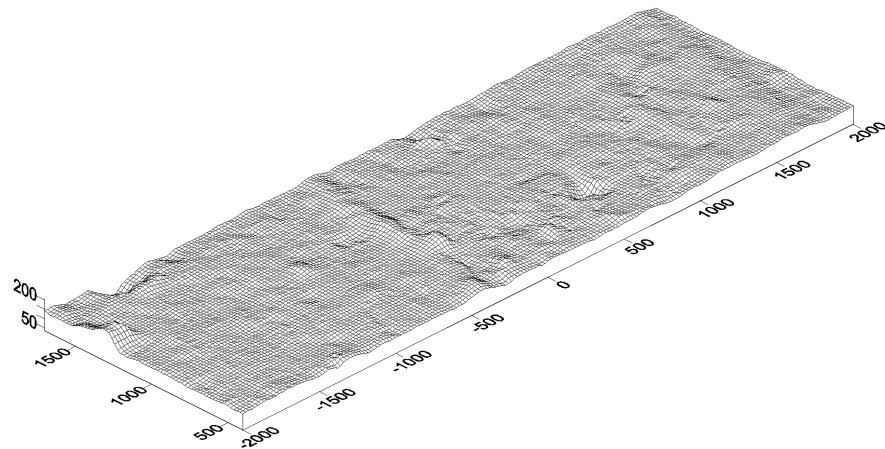


Abb. 15: Differenz der beiden DOM; dargestellt ist hier der Abtrag als Drahtmodell

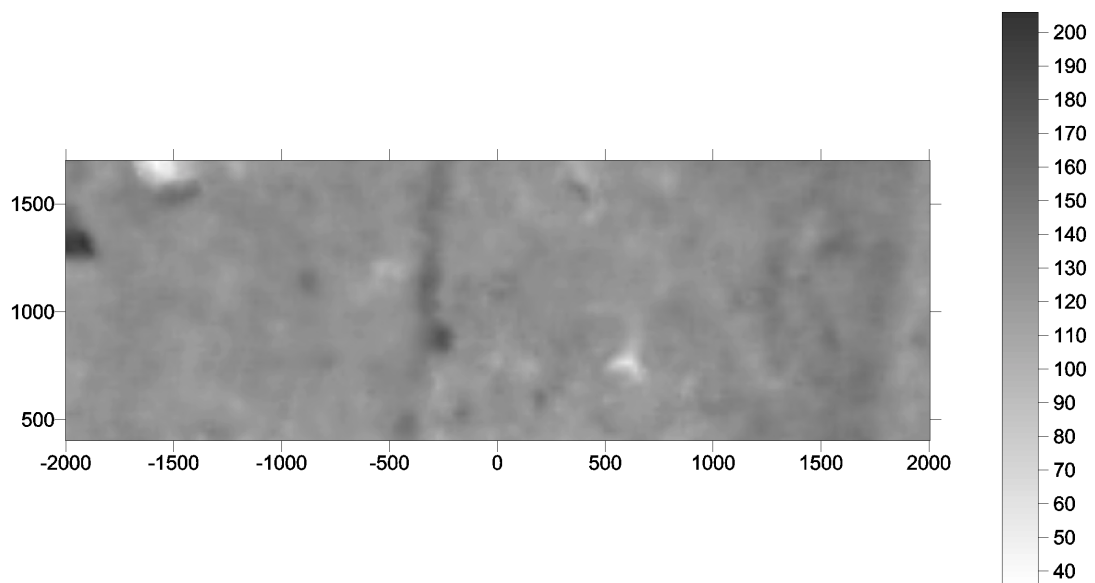


Abb. 16: Differenz der beiden DOM; dargestellt ist hier der graukodierte Abtrag

3.5 Integration mit anderen 3D-Messverfahren

Zur Zielsetzung des Teilprojektes im Rahmen des Sonderforschungsbereichs gehört auch die Integration von dreidimensionalen Topographiedaten unterschiedlicher Messverfahren. Untersuchungen dazu sind zunächst exemplarisch anhand einer Probe durchgeführt werden, wobei die Auswertungen von REM-Aufnahmen wegen ihres breiten Maßstabsbereichs als Referenz dienen sollten.

3.5.1 Datengewinnung mit anderen 3D-Messverfahren

Zur Gewinnung von Topographiedaten mit anderen Messverfahren wurde der Einsatz des Laserscanners des Teilprojekts C4 angestrebt. Dies erwies sich zunächst als problematisch, da das System nicht einwandfrei arbeitet.

Die Datengewinnung mit anderen 3D-Messverfahren ist in Arbeit. Ein vom TP A3 bereitgestellter Bremsbelag, welcher bereits einmal belastet wurde, wird derzeit am LART (Laser-Abtaster, Reibwert und Topographiemesssystem) des TP A3 vermessen, anschließend nochmals belastet, nochmals am LART vermessen und dann an TP B1 weitergeleitet. Nachdem CCD-Bilder des Objekts aufgenommen wurden, soll der Bremsbelag zum TP C4 weitergeleitet werden, wo ein DOM mit dem Interferometer erstellt werden soll. Zuletzt soll die Probe nochmals zum TP B2, wo erneut REM-Aufnahmen unterschiedlicher Vergrößerung gemacht werden, welche dann mit ausgewertet werden können.

Das verwendete REM des Teilprojekts B2 wird auf Grund technischer Parameter kaum für Vergrößerungen größer 1000:1 eingesetzt. Daher verbleibt eine Maßstabslücke zum Einsatz des AFM. Mit dem in der zweiten Phase bei der BAM am TP B2 zu beschaffenden neuen REM soll es möglich sein, deutlich größere Auflösungen zu erzielen, so dass die methodische Lücke geschlossen werden kann. Deshalb wurde die Kombination REM - AFM in den Arbeitsplan für die zweite Arbeitsperiode des Sonderforschungsbereichs verschoben.

3.5.2 Zuordnung und Visualisierung verschiedener 3D-Datensätze

Die zur Integration der Ergebnisse von verschiedenen Messverfahren erforderliche Zuordnung mit Transformation der Raumkoordinaten und anschließender Visualisierung ist Aufgabe der laufenden Projektphase und wird derzeit bearbeitet. Erfahrungen aus der Kombination unterschiedlicher Aufnahmesysteme liegen aus benachbarten Arbeitsgebieten vor /4/. Weitere Vorarbeiten wurden im Rahmen einer Diplomarbeit geleistet /9/.

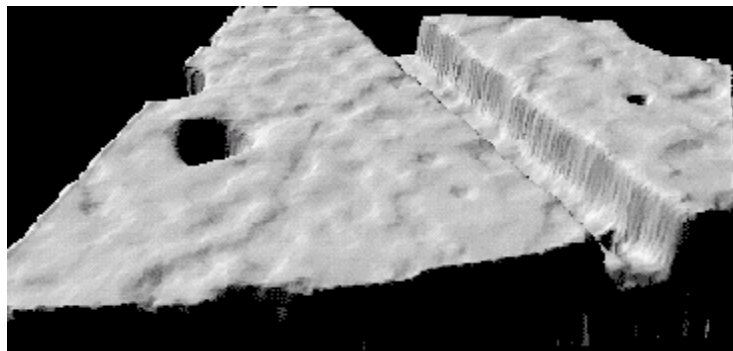


Abb. 17: Überlagerung thematischer Daten

Bei der Visualisierung von Ergebnissen ist es auch möglich, geometrisch exakt dem Oberflächenmodell zugeordnete Daten, einem 3D-Datensatz zu überlagern. Abb. 17 zeigt die Überlagerung eines Schummerungsbildes über das DOM aus Abb. 9.

4 Zusammenarbeit mit anderen Teilprojekten

Die engste Zusammenarbeit erfolgte mit den Teilprojekten A3 (Severin), B2 (Österle), C2 (Knothe) und C4 (Ostermeyer). Um den speziellen Anforderungen der einzelnen Teilprojekte gerecht zu werden, fanden mehrere Treffen und ein reger Informationsaustausch statt.

Das TP A3 stellte mehrere Proben zur Verfügung, an denen geeignete Markierungsverfahren und die Bildaufnahmesysteme getestet werden konnten. Einige dieser Proben wurde an den TP B2 zur Aufnahme mit dem REM weitergeleitet. Um eine photogrammetrische Auswertung mit dem REM zu ermöglichen, wurde dort am REM in Zusammenarbeit mit dem TP B1 ein speziell kippbarer Probenhalter eingebaut. In gemeinsamen Arbeitssitzungen am REM wurden die optimalen Einstellungen für die Erfassung photogrammetrische nutzbarer Bilddaten gewonnen. Die mit dem REM erfassten Bilder wurden via Internet dem TP B1 zugänglich gemacht. Die selbe Probe wurde dann mit dem CCD-Bildaufnahmesystem aufgenommen und ausgewertet. Als Ergebnis wurden die mit dem jeweiligem Bildaufnahmesystem möglichen Genauigkeiten und deren Einsatzmöglichkeiten ermittelt und diese dem TP A3 weitergeleitet.

Die Zusammenarbeit mit dem TP C2 gestaltete sich bisher auf vorwiegend theoretischer Ebene. Fragen bezüglich der Markierung und Aufnahme eines belasteten Gleises müssen auf Grund der anderen Rahmenbedingungen anders als beim TP A3 gelöst werden. Hier wurden konkrete Ansätze zur Aufnahme und Auswertung des Gleises entwickelt.

In gemeinsamen Arbeitssitzungen von B1, C2 und C4 wurde über Methoden diskutiert, mehrere sich überlappende Datensätze geometrisch exakt zusammenzufügen. Als Beitrag zu dieser Diskussion entstand die Diplomarbeit Priesemann /9/.

5 Vergleich mit Arbeiten außerhalb des SFB

Seit Sommer 2000 läuft am Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie der TU Berlin ein von der DFG gefördertes Forschungsprojekt zur Vermessung von Virenoberflächen in Kooperation mit dem Heinrich-Pette-Institut für Experimentelle

Virologie an der Universität Hamburg. Hierbei wird in großem Umfang auf Erfahrungen zurückgegriffen, welche im Rahmen des SFB gemacht wurden.

Die am Fachgebiet entwickelte Software zur photogrammetrischen Auswertung von REM-Daten wird derzeit am Institut für Physikalische Hochtechnologie, Jena, und bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig eingesetzt.

Die verwendeten Matching-Algorithmen wurden in einer Kooperation mit Mitarbeitern des Instituts für Weltraumsensorik und Planetenerkundung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), Berlin Adlershof, verbessert.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Navigation der Universität Stuttgart wurde an der Zusammenführung der Daten unterschiedlicher Aufnahmesysteme für den Nahbereich gearbeitet /4/.

Während der laufenden Förderphase liefen weitere Arbeiten am CCD-Videoaufnahmesystem. Mit Hilfe dieses Systems wurden in Zusammenarbeit mit der Zahnklinik an der Charité der Humboldt-Universität Berlin superelastische Drähte, die in Zahnspangen verwendet werden, vermessen /2/ /6/

In Zusammenarbeit mit der Istanbul Technical University läuft derzeit eine Arbeit, die sich mit einer Bruchfläche einer Schraube von einer Eisenbahnbrücke beschäftigt. Der Bruch soll flächenhaft ausgewertet werden, um auf materialspezifische Parameter rückschließen zu lassen. An Hand dieser Oberfläche sollen auch die messtechnischen Probleme an Unstetigkeitsstellen untersucht werden.

Zur Schaffung und Berechnung eines Bezugskoordinatensystems entstanden selbst entwickelte Programme, die sich auf die Aufgaben des SFB anpassen und verwenden lassen. Hier sind beispielsweise Arbeiten entstanden zur automatischen Passpunktmessung /7/, Netz- bzw. Bündelblockausgleichung /8/ und zur räumlichen Ähnlichkeitstransformation /9/.

6 Ausblick, offene Fragen und weitere Vorgehensweise

Die Auswertung mit dem CCD-Videoaufnahmesystem hat sich als etwas problematisch herausgestellt. Die Genauigkeit in der Höhe ist geringer als angenommen, und es bestehen Instabilitäten der inneren Geometrie der Kameras. Dies läßt sich auf den analogen Datenfluß und der Digitalisierung durch den Framegrabber zurückführen. Für eine hochgenaue Auswertung ist die Auflösung des CCD-Chips von 786x574 Pixel zu gering. Die Funktion und die Anwendung dieses Systems hat sich trotzdem als verwendungsfähig erwiesen. Dieses Problem sollte sich durch die

Beschaffung besserer Kameras lösen lassen, wir denken hier an moderne digitale Stillvideokameras.

Als problematisch erwies sich in der ersten Projektphase die räumliche Trennung von Reibprüfstand, Bildaufnahmesystem und Auswertesystem. Die REM-Proben wurden in der Halle des TP A3 belastet und dann zum TP B2 zum REM oder zu B1 zum Videoaufnahmesystem gebracht, um die Bilder anzufertigen. Diese wurden dann gegebenenfalls per Internet zu B1 übertragen, wo die Auswertung stattfand. Die Ergebnisse konnten dann per Internet wieder weitergeleitet werden. Manche Wege lassen sich nicht vermeiden. Soweit möglich sollen aber die Möglichkeiten moderner Kommunikationstechnologie zum verteilten Arbeiten genutzt werden. Zweckmäßig erscheinen hier zwei Maßnahmen, die zu effektiveren Arbeitsweisen führen sollen:

- a) Schulung des Personals bei B2 bzw. der Datennutzer in der Anwendung des Programms REMmodel, so dass diese die Auswertungen selbständig durchführen können. Dazu ist eine bedarfsgerechte Weiterentwicklung des Programms REMmodel erforderlich.
- b) Einrichtung eines Videoaufnahmesystems in der Versuchshalle des TP A3, um den Transport der Prüfkörper zu vermeiden. Zunächst sollen die Bilder dann per Netzwerk zu B1 übertragen werden, wo die Auswertung stattfindet. Des weiteren soll bei B1 daran gearbeitet werden, die Auswertung soweit zu automatisieren, dass sie bei A3 selbst durchgeführt werden kann.

Beide Maßnahmen sind geeignet, die Messzyklen zu verkürzen und somit mehr Daten für die Analyse zu gewinnen. Voraussetzung ist jedoch auch, dass die regelmäßig erforderlichen Kalibrierungsmaßnahmen weitgehend automatisiert ablaufen können, was bei den weiteren Entwicklungen angestrebt wird.

Es soll ein hierarchisches, mehrskaliges Informationssystem geschaffen werden, welches es erlaubt, zu jeder Probe eine geeignete Anzahl von Punkten abzuspeichern und zu verwalten, so dass nach einem Reibvorgang die Punkte automatisch wieder gefunden werden und die Auswertung des Bildverbandes weitgehend automatisiert werden kann.

Auf der Basis einer gemeinsamen Bildtriangulation aller beteiligten Bilder kann dann die Bestimmung der Oberflächentopographie erfolgen, wobei die Verknüpfungspunkte der Bildtriangulation bereits ein Oberflächenmodell geringer Auflösung bilden, welches als Näherungsmodell verwendet werden kann.

In den Bereichen, in denen mehr als zwei Bilder vorliegen, können mehrere Bildzuordnungsläufe erfolgen. Ein Teil der Bildpunkte wird dann in mehr als zwei Bildern

identifiziert, und die sichttoten Bereiche werden geringer. Dies steigert die Redundanz und damit die Qualität der erstellten Oberflächenmodelle.

Folgende Arbeitsschritte sind daher erforderlich:

- a) Schaffung eines Informationssystems für die Verwaltung der Passpunkte auf den Proben
- b) Optimierung der Datenerfassung für eine weitgehend automatisierte Bildtriangulation
- c) Entwicklung von Strategien für Bildzuordnungen unter Verwendung von mehr als zwei Bildern

Verknüpfung mehrerer Datensätze zu einem Verband

- a) Verknüpfung von Oberflächenmodellen

Vorgesehen ist die Realisierung einer verknüpften räumlichen Affintransformation (nach der Art einer Aerotriangulation mit unabhängigen Modellen) zur Transformation unterschiedlicher Datensätze in ein gemeinsames Bezugssystem. Die Zuordnung identischer Punkte soll durch flächenbasierte Bildzuordnungsverfahren erfolgen, welche auf die grauwertkodierte DOM angewendet werden sollen. Nach der Punktzuordnung werden die entsprechenden Punkte aus dem Höhenmodell extrahiert und als 3D-Passpunkte in die dreidimensionale Affintransformation eingeführt.

- b) Verknüpfung von verschiedenartigen Datensätzen

Es sollen Untersuchungen zum automatischen Zusammenfügen von Datensätzen unterschiedlicher Messsysteme, Messmethoden oder Auflösungen durchgeführt werden. Dazu ist es erforderlich, die automatische Punktzuordnung zwischen Bildern unterschiedlicher Geometrie zu realisieren. Die individuellen Eigenschaften unterschiedlicher zu verknüpfender Datensätze sind bei der Punktzuordnung unter anderem bei der Wahl geeigneter Startwerte zu berücksichtigen. So soll z.B. die geringere Auflösung der Sekundärelektronenbilder von EDX-Analysen bei der Punktzuordnung automatisch berücksichtigt werden. Ziel ist es, die präzise geometrische Überlagerung von Oberflächenmodellen mit den Ergebnissen von EDX-Analysen zu ermöglichen und solche Daten unterschiedlicher Messepochen lage-richtig zu kartieren, um von geometrischen Einflüssen befreite Materialveränderungen und -verlagerungen analysieren zu können.

Optimierung der Auswertestrategien

a) Automatisierung der Kalibrierung

Je nach verwendetem Kalibrierobjekt bei REM und CCD-Kameras, sollen die für die Kalibrierung erforderlichen Punkte automatisch gemessen werden können. Dazu sind geeignete Muster zu entwerfen und robuste Strategien zum Auffinden und exakten Vermessen der Muster zu entwickeln. Bei REM-Aufnahmen werden diese Muster Gitterkreuze sein, bei CCD-Kameras Punktsignale.

b) Unterstützung von anderen Teilprojekten bei der Auswertung

Diverse andere Teilprojekte greifen auf Oberflächenmodelle zurück, welche aus REM-Daten hergeleitet werden. Das TP B1 leistet Unterstützung bei der Auswertung und hilft bei der geometrischen Bearbeitung und Visualisierung diverser Datensätze.

7 Literatur

a) In Zeitschriften mit "Reviewing"-System

- /1/ M. Hemmleb, J. Albertz: Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilder - Grundlagen und praktische Anwendungen. Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation, Heft 1 (1998), S.5-16.

b) Konferenzbeiträge und sonstige Publikationen

- /2/ T. Suthau, M. Hemmleb, D. Zuran, P.-G. Jost-Brinkmann: Photogrammetric measurement of linear objects with CCD cameras - super-elastic wires in orthodontics as an example. IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam 2000.
- /3/ M. Hemmleb, J. Albertz: Microtopography - The photogrammetric determination of friction surfaces. IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam 2000 (im Druck).

- /4/ A. Wehr Fusion of Photogrammetric and Laser Scanner Data. Proc. of the CIPA Int. Symposium '99, Photogrammetry in Architecture, Archaeology and Urban Conservation, Int. Archives for Photogrammetry and Remote Sensing, Band XXXIV, Part 5C1B, Olinda, Brazil, 3.-6. Okt. 1999, auf CD publiziert.
- A. Wiedemann:

c) Dissertationen

- /5/ M. Hemmleb: Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilddaten. Dissertation, eingereicht in der Fakultät 6 der TU Berlin, eingereicht 01/2001.

d) Diplomarbeiten

- /6/ T. Suthau: Photogrammetrische Vermessung von superelastischen Drähten mit CCD-Kameras (1999).
- /7/ R. Annuß: Automatische Passpunktmessungen in der Nahbereichs-photogrammetrie (1999).
- /8/ J.-M. Schumann: Untersuchungen zur kombinierten Ausgleichung geodätischer und photogrammetrischer Beobachtungen (2000).
- /9/ K. Priesemann: Parametrisierbare verknüpfte räumliche Ähnlichkeitstransformation (2000).