

Digitale Oberflächenmodelle von Bremsbelägen – Makrophotogrammetrie mit Videokameras

JOHN MORÉ & STEFAN TREPTE, Berlin

Zusammenfassung: Die Erfassung der Oberflächentopographie von Werkstoffen und deren Veränderungen stellt besondere messtechnische Anforderungen. Einerseits ist es erforderlich, größere Flächen zur Übersicht sowie ausgewählte Details mit höherer Auflösung aufzunehmen. Andererseits muss es möglich sein, Aufnahmen in verschiedenen Skalen und zu verschiedenen Zuständen geometrisch aufeinander zu beziehen, um z. B. Oberflächenveränderungen erfassen zu können. Für solche Aufgaben wurde ein experimentelles Aufnahme- und Auswertesystem entwickelt, das mit zwei Videokameras und verschiedenen Objektiven arbeitet. Als Untersuchungsobjekt dienen Bremsbeläge, die auf einem Prüfstand technischen Reibversuchen unterzogen wurden. Der Aufbau und die Kalibrierung des Systems sowie die Auswertung werden erläutert. Es können Digitale Oberflächenmodelle (DOM) gewonnen werden, in die lokale Daten höherer Auflösung eingebunden sind. Dies ermöglicht eine gezielte Erfassung von interessanten Bereichen, ohne die gesamte Probe in der höchstmöglichen Rasterweite aufnehmen und auswerten zu müssen. Die Erweiterung des Verfahrens, z. B. auf Daten aus dem Rasterelektronenmikroskop (REM), ist möglich. Durch die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten des DOM sowie dessen Überlagerung mit thematischen Daten können wertvolle Interpretationshilfen für die Materialforschung entwickelt werden.

1. Einleitung

In den Materialwissenschaften und in der Industrie besteht oftmals der Bedarf nach

Summary: *Digital Surface Models of Brake Linings – Makrophotogrammetry Using Video Cameras.* To determine the surface topology of materials and their change needs special requirements. It is necessary to record large areas for overview as well as selected details with high resolution. On the other hand the requirement exists to relate recordings in different scales and different conditions geometrically for example in order to understand surface changes. For these kind of tasks we developed an experimental recording- and evaluation system, that works with two videocameras and different objectives. As object for our examination we chose brakelinings, which were subjected to technical friction trials on an examination stand. The experimental design and the calibration of the system as well as the evaluation are explained here. Digital surface models (DOM) can be obtained, in which local data of higher resolution can be integrated. This allows an aimed recording of interesting areas, without the requirement to record and evaluate the whole sample with highest possible resolution. The expansion of the procedure for example for scanning electron microscope data is possible. From the different depiction options of the DOM as well as its overlay with topical data, valuable interpretation aids can be developed for material scientists.

Erfassung und Interpretation der Topographie bzw. der Veränderung der Topographie eines Werkstoffes. Hierzu sind spezielle Aufnahme- und

Auswertesysteme erforderlich, die an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst werden können (BÖSEMANN et al. 2000). Im Zuge des Sonderforschungsbereichs 605 (Elementarereignisse) an der TU Berlin wurde im Fachgebiet Photogrammetrie und Kartographie ein experimentelles Videoaufnahmesystem entwickelt, um Bremsbelagproben in der Größe von $40 \times 40 \text{ mm}^2$ in zwei verschiedenen Vergrößerungen stereophotogrammetrisch zu erfassen und einem gemeinsamen Bezugskoordinatensystem zuzuordnen.

2. Gerätetechnik zur Bilderstellung

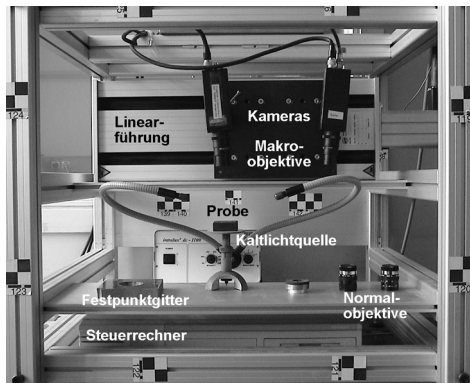


Abb. 1: Laborsystem zur stereophotogrammetrischen Aufnahme mit zwei Videokameras

Das Aufnahmesystem (SUTHAU 2001) besteht aus folgenden Komponenten (Abb.1):

- CCD-Videokameras mit Normal- oder Makroobjektiven

- Linearführung mit Steuerrechner zur Einstellung der Basis
- Befestigungsrahmen
- Windows PC zum Auslesen der Bilder
- Kaltlichtquelle
- Kalibrierobjekt
- Probenhalter mit Passpunktgitter

2.1 CCD-Videokameras, Objektive

Die verwendeten Kameras sind CCIR Standard-Monochrom-Kameras vom Typ Sony XC-77CE. Diese liefern Graustufenbilder in der Auflösung 756×581 Pixel, die mit einem Framegrabber des Windows PCs analog ausgelesen werden.

Das Normalobjektiv hat Vorrichtungen zur manuellen Fokussierung und Einstellung der Blende, während das Makroobjektiv keinerlei Einstellmöglichkeiten bietet. Letzteres ist daher nur in einem fest definierten Abstand und mit einer geeigneten Beleuchtung des Objektraums verwendbar (Technische Daten in Tab. 1).

2.2 Kalibrierung der Kameras / Objektive

Die Kalibrierung erfolgte mit dem für diese Zwecke entwickeltem Programm VerTech mittels Bündelblockausgleichung mit zusätzlichen Parametern (Ergebnisse in Tab. 2) (Verzeichnungsmodelle nach LUHMANN 2000).

Tab. 1: Technische Daten (Herstellerangaben)

	Normalobjektiv	Makroobjektiv
Hersteller, Typ	Cosmicar/Pentax, C1614A-TH	Rodenstock, x0.5
Brennweite	16 mm	35 mm
Horizontaler Bildwinkel	$30^\circ - 40^\circ$ (für $2/3''$ Array)	k. A.
Fokussierungsbereich	0,3 m - ∞	k. A.
Blendenzahl	1,4 - 16	k. A.
Bildmaßstab	k. A.	1:2

2.2.1 Makroobjektive

Der Schärfentiefebereich der Objektive beträgt nur ca. 1,2 mm. Eine Kalibrierung mittels Bündelblockausgleichung ist daher recht schwierig, da die geometrischen Schnittbedingungen sehr ungünstig sind. Ein weiteres Problem ist es, ein geeignetes räumliches Kalibrierobjekt zu konstruieren. Deshalb wurden die Kameras fest auf dem Befestigungsrahmen montiert, eine Glas-Gitterplatte mit der Linearführung im Schärfentiefebereich bewegt und somit ein räumliches Kalibrierobjekt simuliert (Abb. 2). Durch abwechselndes Festhalten der inneren bzw. der äußeren Orientierung konnte nach mehreren Iterationsschritten eine eindeutige Konvergenz der Bündelblockausgleichung erzielt werden. Der Wert der berechneten Kamerakonstanten weicht erheblich von dem Wert der Brennweite aus der Herstellerangabe ab. Das liegt an der Position der CCD-Chips, die ca. 25 mm tief in den Kameras liegen und die Bildweite um diesen Wert vergrößern. Es gibt bei diesen Objektiven nur einen Schärfentiefebereich, der ca. 12 cm vor den Kameras liegt und ein Objektfeld von ca. 16 x 12 mm aufnehmen kann.

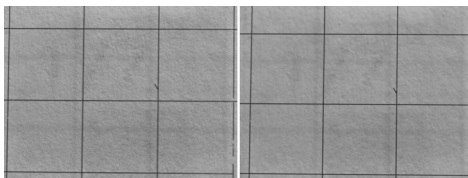


Abb. 2: Zwei in verschiedenen Entfernungen gewonnene Bilder der Kalibrierung

2.2.2 Normalobjektive

Für die Normalobjektive wurde ein räumliches Kalibrierobjekt (Abb. 3) konstruiert, dessen Koordinaten geodätisch eingemessen und mittels Netzausgleichung berechnet wurden. Die Kalibrierung mittels Bündelblockausgleichung ist hier problemlos möglich. Die an diesen Objektiven befindlichen Einstellmöglichkeiten zur Fokussierung und Blendeneinstellung erfordern allerdings bei jeder Aufnahmeserie eine separate Kalibrierung.

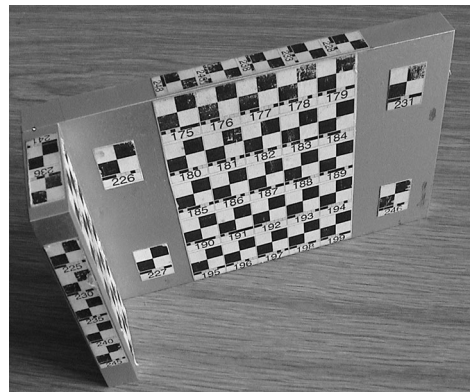


Abb. 3: Räumliches Kalibrierobjekt

2.2.3 Bildfehler und Genauigkeiten

Die Beträge für radiale und tangentielle Verzeichnung sowie die der Scherung und der affinen Verzerrung sind vernachlässigbar klein.

Die Auflösung der Kameras ist im Gegensatz zu aktuellen digitalen Kameras

Tab. 2: Ergebnisse der Kamerakalibrierung

	Normalobjektiv (Beispiel)	Makroobjektiv (Beispiel)
Kamerakonstante	16,247 mm	58,988 mm
Bildhauptpunkt in x	-0,052 mm	0,296 mm
Bildhauptpunkt in y	0,352 mm	0,024 mm
Radiale Verzeichnung	ca. 0,13 %	< 0,1 %
Tangentiale Verzeichnung	< 0,1 %	< 0,1 %
Affinität	< 0,1 %	< 0,1 %
Scherung	< 0,1 %	< 0,1 %

gering. Ein Pixel auf dem CCD-Chip ist $11\ \mu\text{m}$ groß. Sowohl manuelle Messungen als auch Ergebnisse einer automatischen Punktzuordnung (Matching) erlauben die Messung im Subpixelbereich, so dass pauschal ein Messfehler von einem halben Pixel, also $5,5\ \mu\text{m}$ angenommen werden kann.

Bei einem Bildmaßstab von 1:16 (Normalobjektive) entspricht ein halbes Pixel $88\ \mu\text{m}$ im Objektraum. Das Basisverhältnis der Konvergentaufnahmen von 1:6 ließe sich noch verbessern, allerdings wird dann das „Matching“ durch die perspektivische Verzerrung des Objektes in den Bildern immer schwieriger. Bei den Makroobjektiven entspricht ein halbes Pixel à $5,5\ \mu\text{m}$ bei 1:2 Bildmaßstab im Objektraum $11\ \mu\text{m}$ in der Lage. Hier liegt das Problem im Schärfentiefebereich, so dass Konvergentaufnahmen nur sehr begrenzt möglich sind. Die maximale Basis beträgt ca. $25\ \text{mm}$, da sonst Teile der Bilder unscharf werden. Weitere Fehler finden sich in der Ansteuerung der Linearführung bei der Übertragung der Orientierung in die Aufnahmekonfiguration (siehe Kap. 4.2 und Tab. 3).

3. Behandlung der Bremsbeläge

3.1 Prüfeinrichtung

Die Versuche erfolgten auf einem Teilbelag-Schwungmassenprüfstand (TREPTE 2000) an der TU Berlin am Institut für Maschinenkonstruktionen. Ein Gleichstrommotor treibt über eine elektromagnetische Zahnkupplung die Antriebswelle mit der Schwungmasse an.

Ein großer Teil der kinetischen Energie von Antriebswelle und Schwungmasse wird beim Bremsvorgang über die Reibpaarung in Reibungsenergie und damit überwiegend in Wärme umgewandelt. Die Normalkraft erzeugt ein Pneumatikzylinder. Drehzahl und Normalkraft sind stufenlos einstellbar. Die Reibpaarung besteht aus der Bremsscheibe und dem $40 \times 40 \times 15\ \text{mm}^3$ großen Bremsbelag (Abb. 4).

Die geschliffene Bremsscheibe aus Grauguss hat die Maße:

- Innendurchmesser 190 mm
- Außendurchmesser 310 mm
- Dicke 10 mm
- mittlerer Reibungsradius 125 mm.

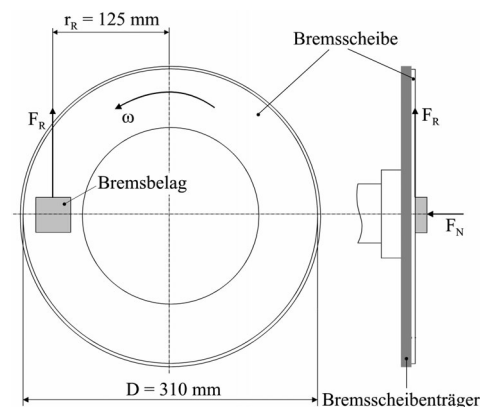


Abb. 4: Reibpaarung des Teilbelag-Schwungmassenprüfstandes

r_R mittlerer Reibungsradius

F_N Normalkraft

ω Winkelgeschwindigkeit

F_R Reibungskraft

D Bremsscheibendurchmesser

Kräfte, Momente, Temperaturen und

Tab. 3: Genauigkeiten

Objektiv	Bildmaßstab	Kamerakonstante c [mm]	Basis b [mm]	Abstand z [mm]	b/z	Lagegenauigkeit m_{yx} [mm]	Höhen- genauigkeit m_z [mm]
Normal	~ 1:16	16,247	40	245	1:6	0,088	~ 0,5
Makro	1:2	58,988	25	118	1:5	0,011	~ 0,05

Drehzahlen am Teilbelag-Schwungmassenprüfstand werden mit verschiedenen Aufnehmern elektrisch gemessen. Diese nichtelektrischen Messgrößen wandeln die Aufnehmer in proportionale Spannungen oder Ströme um.

Unter der Reibpaarung befindet sich ein optischer Partikelzähler zur laseroptischen Online-Messung der Verschleißpartikel. Der Partikelzähler saugt die Verschleißpartikel 22 mm unterhalb der Reibpaarung über ein am Bremshebel befestigtes Kupferrohr ab. Die Ansaugstrecke ist senkrecht. Das Messprinzip basiert auf der 1908 vom deutschen Physiker GUSTAV MIE formulierten Streulicht-Theorie für kugelförmige Partikel (MIE 1908, GEBHART 1989). Die einzeln durch die Messzelle strömenden Partikel beleuchtet ein He-Ne-Laser. Das dabei entstehende Streulicht erfasst ein Photodetektor. Der Messbereich beträgt 0,2 - 5,0 μm . Ein am Partikelzähler angeschlossenes Notebook zeigt Durchmesser, Anzahl und Verteilung der Verschleißpartikel online während der Messung an.

3.2 Versuchsdurchführung

Der untersuchte organisch gebundene Reibwerkstoff B1 ist ein Scheibenbremsbelag für Schienenfahrzeuge. Hersteller ist die Honeywell Bremsbelag GmbH. Beläge dieser Sorte werden u.a. im ICE für Fahrgeschwindigkeiten bis 280 kmh^{-1} verwendet.

Mit der in der Abb. 5 (rechts) sowie in den Abb. 8 und 9 gezeigten Probe wurden 500 Stoppbremsungen (100 Stoppbremsungen je Versuchsreihe) mit einer Flächenpressung $p = 0,1 \text{ MPa}$ und einer Reibungsgeschwindigkeit $v_{R1} = 9,2 \text{ ms}^{-1}$ gefahren (erster Versuchstag: 300 Stoppbremsungen, zweiter Versuchstag: 200 Stoppbremsungen).

Nach dem Erreichen der Soll Drehzahl erfolgte das Trennen von Motor und Antriebswelle und das Abbremsen der rotierenden Massen auf die Drehzahl null. Die Dauer einer Bremsung betrug 60 s. In den Pausen nach 100 Stoppbremsungen wurde der Bremsbelag ausgebaut und mit einer Analysenwaage gewogen. Die Einbauposition des Bremsbelages war stets die gleiche. Dies ist besonders im Hinblick auf die nachfolgende Untersuchung der Oberflächentopographie zu beachten. Nur so lassen sich plausible Aussagen zur Veränderung der Bremsbelagoberfläche infolge der Belastung und zur Übertragung von Oberflächenstrukturen der Bremsscheibe auf den Bremsbelag machen. Bei Blickrichtung auf die Belastungsseite der Bremsscheibe drehte die Antriebswelle entgegen dem Uhrzeigersinn (Abb. 4). Die Reibungsgeschwindigkeit v_{R1} ist auf den mittleren Reibungsradius $r_R = 125 \text{ mm}$ bezogen.

4. Aufnahme und Auswertung von Bremsbelagproben

Die Abb. 5 zeigt zwei verwendete Proben. Die runde Probe (links) ist ein für experimentelle Zwecke angefertigter Belag. Eingefräste Gräben verschiedener Breiten und mehrere Bohrungen in verschiedenen Durchmessern und Tiefen halfen den Schärfentiefebereich, Unstetigkeitsstellen und die Güte des „Matching“-Algorithmus zu ermitteln.

Die quadratische Probe (Abb. 5 rechts) wurde den in Abschnitt 3 beschriebenen Reibversuchen unterzogen. Um einen topografischen Vergleich zwischen verschiedenen Reibbelastungen zu ermöglichen, wurde der Rand einer Probe um 1 mm abgefräst, um dort ein Referenzsystem zu schaffen.

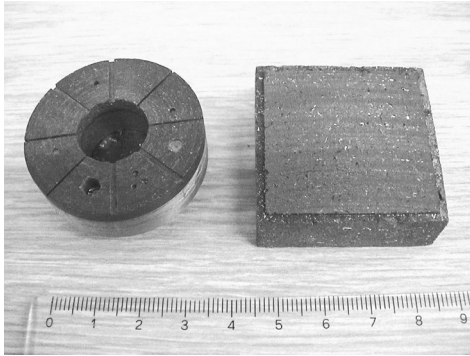


Abb. 5: Bremsbelagproben

4.1 Aufnahme mit der Normaloptik

An beiden Kameras werden die Normalobjektive angebracht. Die Probe wird auf das Kalibrierobjekt gelegt (Abb. 3), Belichtung und Fokussierung eingestellt, und Konvergenzaufnahmen gemacht. Die Basis wird mit der Linearführung eingestellt.

4.2. Aufnahme mit der Makrooptik

Beide Kameras werden mit den Makroobjektiven bestückt. Zur Bildorientierung wird erst einmal ein Festpunktgitter (eine auf einem 15 mm starken Block montierte Gitterfolie) in den Schärfentiefebereich der linken Kamera gebracht, wobei auf eine geeignete Beleuchtung zu achten ist. Dann wird ein vorprogrammierter Ablauf der Linearführung ausgeführt.

Anschließend wird das Festpunktgitter gegen die Probe ausgetauscht und ein Ausschnitt der Probe mit der linken Kamera gewählt. Da die Probe und das Gitter gleich dick sind, liegt die Probe automatisch im Schärfentiefebereich. Der Ablauf der Linearführung wird ein weiteres Mal ausgeführt. So ist es möglich, die vorher ermittelte Bildorientierung auf die Bilder des Probenausschnitts zu übertragen (Abb. 6).

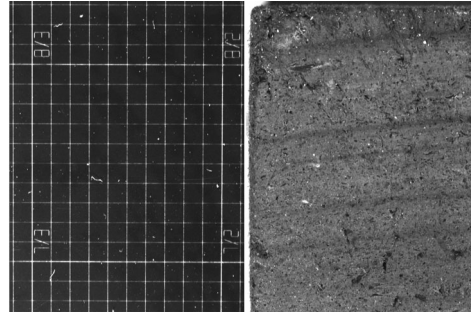


Abb. 6: Mit der Makrooptik gemessene Bilder (links Festpunktgitter, rechts Probe)

4.3 Messung der Fest- und Verknüpfungspunkte

Die Messung der Passpunkte des räumlichen Kalibrierobjekts für die Normaloptik erfolgt automatisch. Per Hand werden die Messungen überprüft und gegebenenfalls vervollständigt. Zur Bildorientierung der Bilder der Makrooptik werden die Schnittpunkte der Linien des Festpunktgitters per Hand gemessen. Als weiteres werden die Eckpunkte der Probe (Normaloptik) und mindestens sechs homologe Punkte in den Bildern der Makrooptik und der Normaloptik per Hand ermittelt.

4.4 Messung von homologen Punkten

Um ein digitales Oberflächenmodell möglichst lückenlos zu erstellen, muss die maximale Anzahl an homologen Punkten auf der Probe gefunden werden. Dies wird mit einer automatischen flächenbasierten Punktzuordnung (Matching) in dem Programm REMmodel (HEMMLEB & ALBERTZ 1998) realisiert. Nach Auswahl eines Bildausschnitts werden mittels einer Produktmomentenkorrelation und anschließender Kleinste-Quadrate-Ausgleichung homologe Punkte gesucht.

4.5 Auswertung der Aufnahmen

Die Kameras sind fest an der Linearführung verschraubt, so dass sich die Drehwinkel nicht verändern. Trotzdem wird, wegen der besseren Fehlerverteilung, bei jeder Bildorientierung ein räumlicher Rückwärtsschnitt gerechnet (WIEDEMANN et al. 2001, KRAUS 1994/96).

4.5.1 Probenfestes Bezugskordinatensystem

Um nun Messungen verschiedener Aufnahmesysteme und Maßstäbe miteinander verbinden zu können und Ausreißer in den Messungen (Fehlmatchings) zu finden, wird ein Bezugskordinatensystem der Probe geschaffen. Da die Oberfläche der Probe quadratisch und grob als Ebene definierbar ist, werden die Eckpunkte der Probe als Punkte der XY-Ebene eingeführt. Die Z-Achse steht senkrecht darauf, und der Ursprung befindet sich im linken unteren Eckpunkt. Diese Punkte werden mittels Bündelblockausgleichung im Koordinatensystem des Kalibrierobjektes berechnet. Die Kantenlängen der Probe betragen je 40 mm und es kann mit hinreichender Genauigkeit angenommen werden, dass benachbarte Kanten orthogonal zueinander sind. Somit wird das Bezugskordinatensystem über drei Eckpunkte erstellt. Der vierte Eckpunkt wird nur zur Verprobung herangezogen. Die Parameter der räumlichen Ähnlichkeitstransformation werden über die identischen Eckpunkte beider Koordinatensysteme ermittelt. Mit Hilfe der Restklaffungen kann entschieden werden, ob die Messungen in den Bildern ausreichend genau zur Definition des Probenkoordinatensystems sind.

4.5.2 Auswertung der Bilder der Normaloptik

Die Messgenauigkeit des Aufnahmesystems in der Höhe liegt bei ca. 0,5 mm, und die Oberflächenbewegung kann auf maximal 0,1 mm geschätzt werden. Da die Oberfläche der Probe nahezu in der XY-Ebene oder parallel dazu liegt, lassen sich Ausreißer in der Höhe gut finden.

Trotz der geringen Genauigkeit eines DOMs mit dieser Optik, können gröbere Strukturen und die Probe im Ganzen dargestellt werden. Dies gilt als großflächige Referenz zur Positionierung genauerer DOM von Teilbereichen.

4.5.3 Auswertung der Bilder der Makrooptik

Im Gegensatz zur Auswertung mit der Normaloptik, ist bei der Makrooptik der Prozess der Orientierung und die Erstellung der Punktwolke getrennt (siehe Kap. 4.2). Da die innere Orientierung bei jeder Aufnahme gleich bleibt, wird die in Kap. 3.1 ermittelte Kalibrierung verwendet. Die äußere Orientierung erfolgt mit den Aufnahmen des Festpunktgitters durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt. Die Ausgleichung zeigt eine gute Konvergenz und hinreichend genaue Werte der äußeren Orientierung.

Als nächstes werden die Aufnahmen der Probe ausgewertet. Per Hand werden Verknüpfungspunkte in beiden Bildern und in denen der Normaloptik gemessen. Auch hier wird mit REMmodel eine flächenbasierte Punktzuordnung ausgeführt und die Punktwolke erzeugt.

Die Messgenauigkeit der Makrooptik in der Höhe liegt bei ca. 0,05 mm, die maximale Oberflächenbewegung wird auf ca. 0,1 mm geschätzt. Da die Oberfläche des Festpunktgitters bei der Aufnahme nahezu parallel der Ebene der Probenoberfläche verläuft, sind auch hier Ausreißer in der Höhe einfach zu finden und zu eliminieren.

Das in der Punktwolke beschriebene Oberflächenmodell kann hier nur einen kleinen Teil der Probe ohne Bezug zur absoluten Lage wiedergeben. Im Gegensatz zur Normaloptik kann hier schon eine Erfassung der Oberflächentopographie erfolgen und relevante geometrische Aussagen in dem Genauigkeitsbereich zulassen.

5. Geometrische Zuordnung von Oberflächenmodellen

Es gilt nun, alle DOM miteinander geometrisch zu verbinden, um ein Gesamtbild der Probe mit Verfeinerungen in den detaillierter erfassten Bereichen, zu erhalten. Hierbei besteht das Problem, Oberflächenmodelle mit verschiedenen Rasterweiten und Genauigkeiten einander zuzuordnen (Abb. 7). Ein automatisches Verfahren, beispielsweise eine „raumbasierte“ Punktzuordnung, wäre wünschenswert, doch dies ginge nur bei signifikant ähnlichen Höhenwerten. Eine Zuordnung der DOMs der Makrooptik mit dem der Normaloptik ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Genauigkeiten nicht möglich. Wegen der schlechten Aussicht auf Erfolg, wurde dieser Ansatz zunächst verworfen.

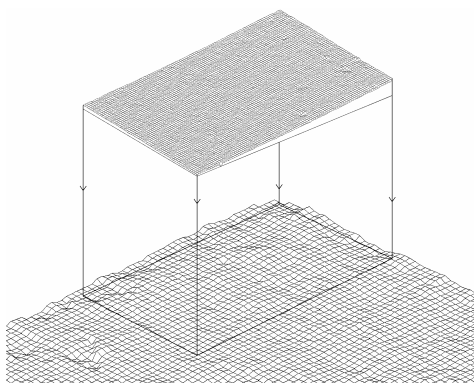


Abb. 7: Schematische Darstellung der geometrischen Zuordnung zweier DOM

5.1 Zuordnung durch räumliche Ähnlichkeitstransformation

Um die Zuordnung der DOM zu ermöglichen, werden in den Bildern der Normal- und der Makrooptik homologe Punkte für eine 2D-Helmerttransformation gemessen. Die Punktwolke aus den Makroaufnahmen wird somit in der Lage an die richtige Stelle im Bezugskoordinatensystem gebracht. In der Höhe wird diese auf die Probenoberfläche angepasst, indem der in der Lage deckungsgleiche Inhalt der ungenaueren Punktwolke ausgeschnitten und ein beliebiges Raster über beide Punktwolken gelegt wird. Anhand der Rasterpunkte in beiden Punktwolken können auf Grund der hohen Punktdichte identische Punkte in der Lage gefunden werden. Da die Verdrehung beider Punktwolken gegeneinander sehr gering ist, kann mit diesen pseudo-identischen Punkten eine räumliche Ähnlichkeitstransformation durchgeführt und die transformierte Punktwolke in das Probenkoordinatensystem eingefügt werden.

Mit dieser Methodik können auch REM-Aufnahmen und deren DOM als weitere Verfeinerung eingefügt werden. Als Ziel soll ein DOM mit beliebig vielen Verfeinerungen entstehen, um dies als geometrische Grundlage eines „Probeninformationssystems“ bereitzustellen.

5.2 Darstellungen

Zur besseren Veranschaulichung können zur Darstellung von DOM auch noch die Bilder als Textur überlagert werden (Abb. 8). Sowohl Orthobilder (Abb. 9), als auch virtuelle „Überfliegungen“ über das Modell der Probe geben eine noch bessere Übersicht.

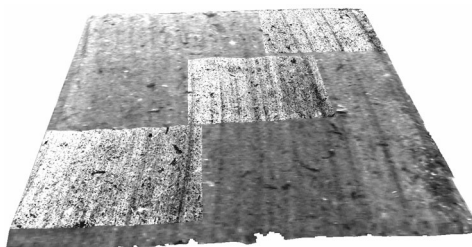


Abb. 8: DOM mit überlagelter Textur

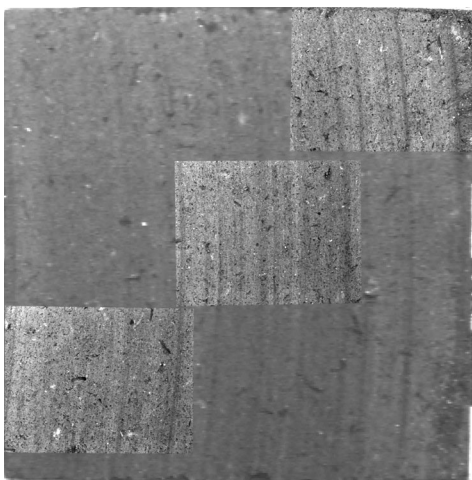


Abb. 9: Orthobild der aufeinander bezogenen Bilddaten verschiedener Auflösung

In Abb. 9 ist gut zu erkennen, dass die Laufspuren der Bremsscheibe über die jeweiligen Bereiche nahezu ohne Versatz verlaufen. Obwohl die Bereiche der Bilder der Makrooptik größer als der Bereich des zugehörigen DOM sind, lassen sich diese gut auf das Gesamt-DOM entzerren.

6. Auswertung und Ausblick

Mit diesem experimentellen Video-Aufnahmesystem lassen sich trotz relativ geringer Genauigkeiten eindrucksvolle und nützliche Ergebnisse erzielen. Mit der Normaloptik kann ein Bezugssystem geschaffen und mit der Makrooptik können detaillierte Oberflächenstrukturen erfasst werden. Die Zuordnung der DOM gelang

in einer hinreichenden Genauigkeit trotz der geringen Bildauflösung der Kameras.

Die Auswertung erfolgte ausschließlich mit selbst geschriebenen Programmen. Bei der digitalen Bildverarbeitung und der Darstellung der Oberflächenmodelle wurden kommerzielle Programme verwendet.

Zur Weiterentwicklung des Verfahrens sind höher auflösende Kameras nötig. Ein weiteres Problem ist noch der recht aufwendige Auswertevorgang. Hier ist eine Optimierung der hintereinander geschalteten Vorgänge sowie eine weitgehende Automatisierung in Arbeit. Die Einbindung von REM-Aufnahmen wurde bisher nur theoretisch behandelt und bedarf einer Realisierung.

Die Vorteile der digitalen Oberflächenmodelle für die Erforschung und Bewertung von Reibwerkstoffen sind:

- räumliches Darstellen der beanspruchten Oberfläche,
- virtuelles „Überfliegen“ der Oberfläche,
- Bestimmen der realen Kontaktfläche und
- Sichtbarmachen der Wirkung von Gegenwerkstoff, Normalkraft, Reibungsgeschwindigkeit und Reibungsarbeit auf die sich ausbildenden Oberflächenstrukturen.

In den Abb. 8 und 9 ist deutlich die Übertragung der Rillenstruktur der Bremsscheibe auf den Bremsbelag zu erkennen. Das Glätten der Bremsbelagoberfläche erfolgt bei der untersuchten Probe vorwiegend durch Abschleifen infolge des langen Bremsweges bei niedriger Flächenpressung. Mit Drahtgittermodellen der Oberfläche ist dieser Effekt durch einen Vergleich vor und nach der Belastung besonders gut zu erkennen.

Die Energiewandlung bei der Reibung ist immer mit Stoffdeformation verbunden (FLEISCHER et al. 1989). Digitale Oberflächenmodelle können bei der Darstellung und Beschreibung dieser

Deformationen einen wichtigen Beitrag leisten.

7. Danksagung

Unser Dank gilt der DFG für die Förderung des SFB 605, Prof. Dr.-Ing. JÖRG ALBERTZ und Dipl.-Ing. ALBERT WIEDEMANN für wissenschaftliche Hilfestellungen und Prof. Dr.-Ing. DIETRICH SEVERIN für die gute Zusammenarbeit im SFB 605.

8. Literatur

BÖSEMANN, W. et al., 2000: Photogrammetric Measurement Techniques for Quality Control in Sheet Metal Forming, IAPRS, B5, S. 291-298.

FLEISCHER, G. et al., 1980: Verschleiß und Zuverlässigkeit. VEB Verlag Technik, Berlin.

GEBHART, J., 1989: Funktionsweise und Eigenschaften optischer Partikelzähler. Technisches Messen 56, Nr. 5, S. 192-203.

HEMMLEB, M. & ALBERTZ, J., 1998: Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilder – Grundlagen und praktische Anwendungen, PFG 1/98.

KRAUS, K., 1994: Photogrammetrie, Band 1. 5. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.

KRAUS, K., 1996: Photogrammetrie, Band 2. 3. Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.

LUHMANN, T., 2000: Nahbereichsphotogrammetrie. Wichmann Verlag, Heidelberg.

MIE, G., 1908: Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen. Annalen der Physik, Vierte Folge, Band 25, S. 377-445.

SUTHAU, T. et al., 2001: Close Range Photogrammetry with CCD Cameras and Matching Methods - Applied to the Fracture Surface of an Iron Bolt. In: O. Altan & L. Gründig (eds.) Fourth Turkish-German Joint Geodetic Days at Berlin, Germany, April 2-6, Vol. I, pp. 203-209

TREPTE, S. & GRIESEL, J., 2000: Neu entwickelter Bremsenprüfstand. RIQ Rexroth Information Quarterly, Nr. 4, S. 18-19.

WIEDEMANN, A. et al., 2001: Comparison of Bundle Block Adjustments for Close Range Applications. In: O. Altan & L. Gründig (eds.) Fourth Turkish-German Joint Geodetic Days at Berlin, Germany, April 2-6, Vol. I, pp. 211-218.

Anschrift der Verfasser:

Dipl.-Ing. John Moré, TU Berlin, Photogrammetrie und Kartographie, EB 9, Straße des 17. Juni 135, D-10623 Berlin, Tel.: 030/314-23991, e-mail: john@fpk.tu-berlin.de

Dipl.-Ing. Stefan Trepte, Dorfstr. 14, D-06388 Piethen, Tel.: 034976/32604, e-mail: Stefan.Trepte@gmx.de