

Methoden des Zentrallabors im BLfD

Teil 3: 3D-Mikrotopografie- und Rauheitsmessung – Gratwanderung zwischen simplifizierender numerischer Reduktion und getreuer Abbildung einer subtilen mikroskopischen Realität

Einordnung im System der Methoden

Zumindest auf der sprachlichen Ebene ist der Konflikt ausgekämpft: Eine als zunehmend altmodisch empfundene, nicht mehr normgerechte „Rauhigkeit“ musste mittlerweile der stromlinienförmigeren „Rauheit“ weichen. Die kleine Sprachfehde spiegelt nicht nur den gleichermaßen vorbildlichen wie berüchtigten deutschen Ordnungswillen, sondern auch bemerkenswerte erkenntnistheoretische Abgründe, die sich hinter modischen Begriffen wie etwa dem des „3D-Topografie-Messplatzes“ verbergen. Im alltäglichen Sprachgebrauch rangiert der Begriff der Oberfläche gefährlich nahe an der Oberflächlichkeit, weshalb verwandte Begriffe wie die „originale Oberfläche“ auch in der breiten Öffentlichkeit gelegentlich auf Skepsis stoßen. Es steht jedoch außer Frage, dass sich gerade die Denkmaloberflächen, besonders wenn man ein wenig über die rein mathematische Betrachtung hinaus denkt, als besonders ergiebig und informationsreich darstellen. Viele dieser Informationen in der „Haut“ der Objekte sind ohne technische Hilfsmittel nicht auslesbar – man denke nur an die Fülle zusätzlicher Daten, die durch einfache lichtmikroskopische Betrachtungen, Spurenelementanalysen oder UV-Fotografien gewonnen werden können. Auch ohne Nietzsches Erkenntnistheorie ist allerdings leicht zu verstehen, dass jede zusätzliche Betrachtungsweise, wenn sie nicht durchdacht eingesetzt wird, schlimmstenfalls lediglich den passiven Datenbestand steigert. Zusätzliche Daten müssen deshalb mit bereits klarer Zielsetzung gewonnen und hinterher zum Sprechen gebracht werden. Erfolge in der Bearbeitungskette werden sich in erster Linie dann einstellen, wenn alle Beteiligten Wirkungsweise und Grenzen der in Frage kommenden

Methoden zumindest in den Grundzügen verstanden haben.

Der wohl markanteste Vorteil der 3D-Mikrotopografie- und Rauheitsmessung liegt in der Tatsache, dass sie die Oberflächengeometrie aus dem übrigen Informationsdickicht abzutrennen vermag, d. h. eine isolierte und quantifizierende Betrachtung der reinen geometrischen Oberflächenstruktur erlaubt. Der schmerzlichste Nachteil liegt in der Tatsache, dass eine Objekt-oberfläche, ähnlich einer Küstenlinie, beim genaueren Hinsehen stetig komplizierter und schwerer einsehbar wird. Bereits am Beispiel eines gewöhnlichen Wurmgangs in einer barocken Holzfigur wird klar, wie dreidimensional eine vermeintlich ebene Oberfläche beim genaueren Hinsehen erscheinen kann. Es ist ebenfalls leicht zu verstehen, dass praktisch alle gängigen 3D-Oberflächentopografiemessgeräte bereits in der ersten Kurve eines derartigen Wurmgangs ausgestiegen sein werden. Diese Einschränkung gilt übrigens keineswegs nur für minder bedeutsame Wurmgänge, sondern für praktisch alle Hinterschneidungen – an jedem Objekt.

Ein Blick auf Grundlagen und eingesetzte Methoden

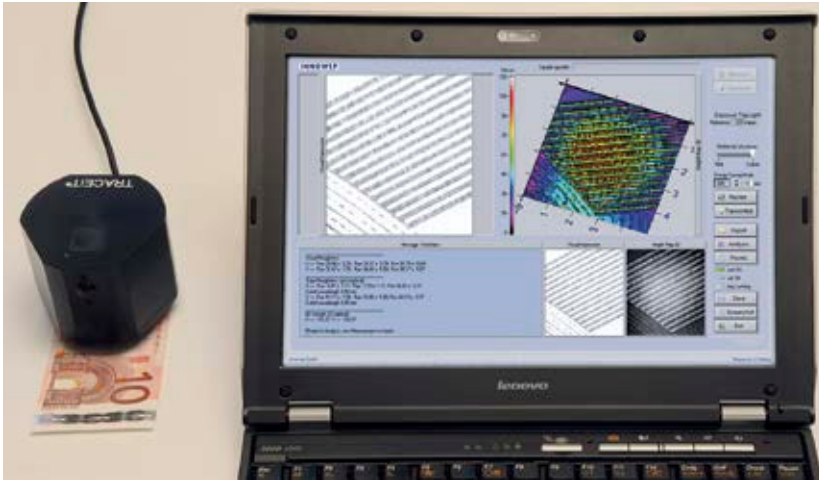
Im Unterschied zu den bisher betrachteten Methoden (Röntgen-Pulverdiffraktometrie in DI Nr. 157 und Endoskopie in DI Nr. 158) sind die zum Verständnis der Mikrotopografie- und Rauheitsmessung wünschenswerten theoretischen Grundlagen schwierig und die eingesetzten Verfahren vielfältig. Hier in den Denkmalpflege Informationen ist deshalb nur eine grob vereinfachende Darstellung möglich. Pragmatisch betrachtet reicht es jedoch häufig aus zu verstehen, dass für die Charakterisierung flächig-homogener Morphologien genormte Rauheitskennwerte, insbeson-

dere der sogenannte Rz- und Ra-Wert, zur Verfügung stehen. Diese Parameter eignen sich, um beispielsweise unterschiedlich fein geschliffene Oberflächen numerisch miteinander zu vergleichen. Weitergehende, mathematisch gestützte Betrachtungsweisen erlauben es, die Höhen- und Tiefenverteilung in einer Oberfläche zu charakterisieren (ob quasi eher Löcher, Stacheln oder indifferente Verteilungen vorliegen). Schließlich lassen sich auf der Basis von Topografiedaten Winkel- und Streckenmessungen sowie Volumenabschätzungen ausführen. Gemessene Volumina könnten z. B. auf planer Oberfläche („Höhe $z = 0''$) aufliegende Krusten („Volumen über Höhe $z = 0''$) oder Korrosionsgruben („Volumen unter Höhe $z = 0''$) sein. Die Rauheitskennwerte erlauben einen vereinfachten, rein numerischen Vergleich größerer Objektgruppen, während sich die Topografiemessung eher für die tatsächliche Oberflächen-Mikrogeometrie, typischerweise in einem konkreten Einzelfall interessiert.

Wie bereits angedeutet, sind sämtliche hier vorgestellten Messungen methodenbedingt etwas fehlerbehaftet. Sie bilden die Realität immer nur näherungsweise ab. Insbesondere scharfe Kanten und Hinterschneidungen werden von den gängigen Geräten genauso wenig gesehen wie sehr feine Details. Mag auch mancher Gerätehersteller Genauigkeiten in der Größenordnung von 1/1.000 mm spezifizieren, so zeigt sich in der Praxis schnell, dass die meisten Apparate die reale Welt höchstens im Lupenmaßstab noch zuverlässig abbilden. Viele Details, die im Lichtmikroskop noch problemlos erkennbar sind, werden schlichtweg übersehen.

Die mechanische Abtastung

Ähnlich wie bei einem altmodischen Plattenspieler wird eine Nadelspitze



Interferometrisches Rauheitsmessgerät des Zentrallabors. Die gesamte Messelektronik ist in einem sehr kompakten Messkopf (links) konzentriert. Sie kommt ohne bewegliche Teile aus. Der Messkopf wird auf die zu betrachtende Oberfläche gelegt und fokussiert dort automatisch. Zugehöriges Video-Livebild, Messdaten und Rauheitsauswertung erscheinen auf dem Laptop-Bildschirm. Dank der Bauart ist ein mobiler Einsatz problemlos möglich. Maximal zulässige Höhendifferenz: 2 mm (Foto: BLfD, Martin Mach)

geradlinig über die zu vermessende Oberfläche geführt. Aufzeichnen lässt sich auf diese Weise in der Regel nur ein einfaches Linienprofil, das die Höhen und Tiefen einer Oberfläche entlang einer einzelnen Strecke wiedergibt. Dieses gemessene Profil kann, je nach Tast-

nadelform und Abtastgeschwindigkeit, durchaus etwas unterschiedlich ausfallen: Eine zu schnell bewegte Nadelspitze kann prellen, d. h. regelrecht über die Oberfläche hinweghüpfen, ein zu grobschlächting gewählter Tastkopf wird feine Erhebungen nicht registrie-

ren können. Das exakte Wiederfinden einer Profillinie für Vergleichszwecke, z.B. nach einer zwischenzeitlich vorgenommenen Oberflächenbehandlung, ist bei der mechanischen Linienabtastung schwieriger als bei den moderneren, flächig arbeitenden Verfahren. Ein Vorteil der mechanischen Abtastung liegt allerdings in der Tatsache, dass tiefschwarze, spiegelnde oder teiltransparente Oberflächen keine Probleme bereiten, während lichtoptisch arbeitende Geräte hier Warnmeldungen ausgeben, den Dienst völlig verweigern, oder aber – schlimmstenfalls – stillschweigend fehlerbehaftet weitermessen.

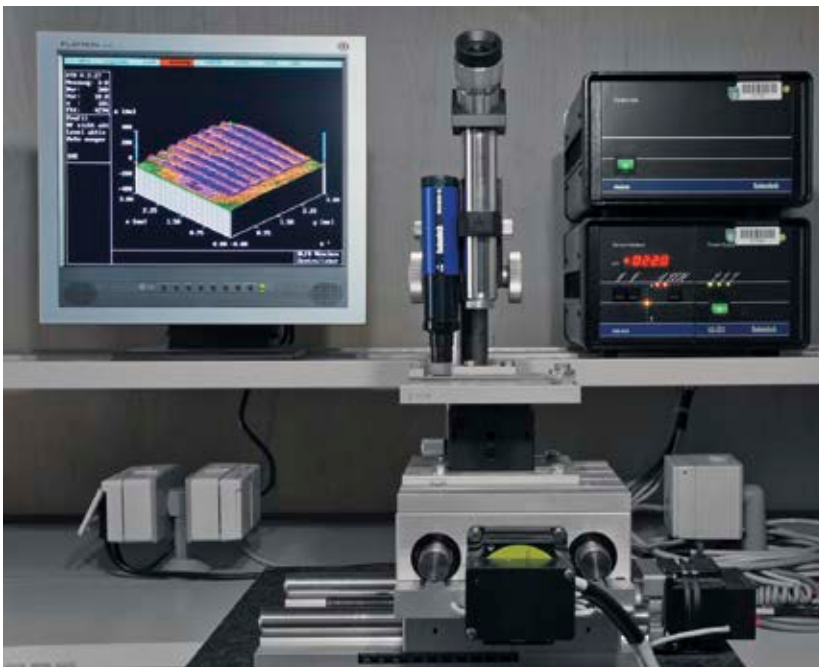
Das interferometrische Gerät

Das interferometrische Messgerät arbeitet mit aus verschiedenen Richtungen eingestrahltm Weißlicht. Es ermittelt die jeweilige Objekttopografie und Rauheit auf der Basis von Lichtwellen-Phasenverschiebungen, im Zweistrahlverfahren. Flächige Messungen erfolgen sehr flink, typischerweise in Sekunden. Die Rauheitskennwerte R_z und R_a sowie andere Auswertungsdetails lassen sich auf diese Weise in Rekordschnelle ermitteln. Sehr feine Oberflächencharakteristika werden allerdings nicht immer in ihrer vollen realen Geometrie erkannt, was bei pauschalen Vergleichen jedoch nicht unbedingt von Nachteil sein muss. Man sollte sich jedoch der messtechnisch bedingten topografischen „Weichheit“ bewusst sein. Sie ist nun mal der Preis für Schnelligkeit und hohe Wirtschaftlichkeit.

Das Laserfokus-Messgerät

Ein Infrarotlaserstrahl wird mit festem Fokus spitz-konisch auf die zu messende Objektfläche fokussiert und anschließend auf einen Autofokussensor zurückgespiegelt. Erhöhungen und Vertiefungen auf der Objektfläche führen zu einer Defokussierung des Lasers, die durch eine sofortige Anhebung bzw. Senkung des optischen Sensorsystems ausgeglichen wird. Der Höhenversatz folgt somit exakt der Topografie des Objekts und wird elektronisch mitprotokolliert.

Ein x-y-Tisch bewegt die Probe unter dem Sensorsystem so, dass die interessierende Oberfläche nach und



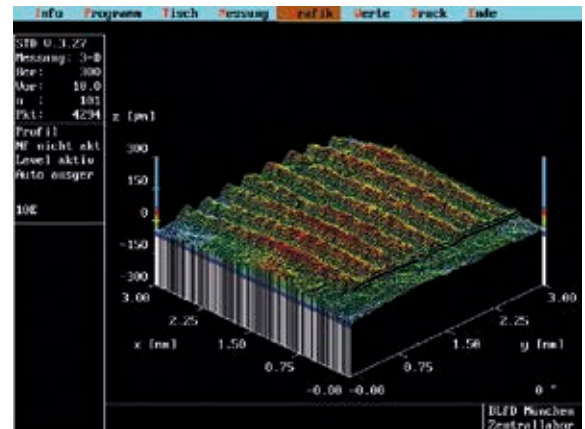
Laserfokus-3D-Topografiemessplatz des Zentrallabors. Das Laser-Sensorsystem befindet sich in dem blauen Zylinder (Bildmitte), direkt rechts daneben das silberfarbene „Zielfernrohr“ zur visuellen Kontrolle. Die Probe wird mit Hilfe des schweren, motorisch gesteuerten x-y-Präzisionstisches zeilenweise unter dem Laser-Sensorsystem durchgeführt, wobei sich nach und nach ein dreidimensionales Abbild der Oberfläche aufbaut. Dieses Gerät kann nur stationär betrieben werden, jedoch Oberflächenabdrücke von fernab gelegenen Objekten auswerten. Langsam arbeitend, aber dafür sehr präzise und nach Tausenden von Messungen ohne jegliche Wartung immer noch in Betrieb. Maximal zulässige Höhendifferenz: 0,6 mm (Foto: BLfD, Martin Mach)

nach zeilenweise erfasst wird. Die Messzeiten hängen vor allem von der Größe des jeweiligen Messfeldes ab, liegen typischerweise bei 30 Minuten oder höher.

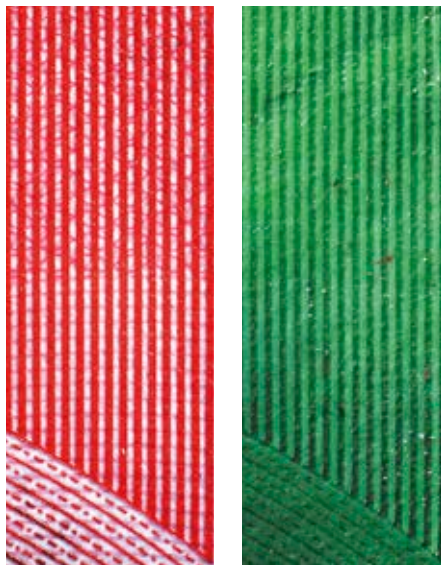
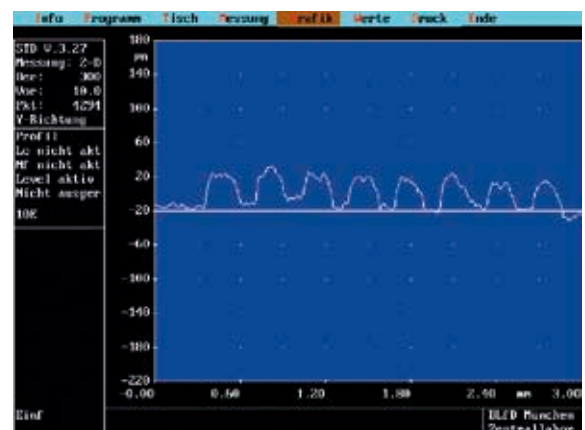
Zur Veranschaulichung: Rauheitsmessung am 10-Euro-Geldschein

Im Zentrallabor wurden in den letzten Jahrzehnten Tausende von Rauheitsmessungen, vor allem im Rahmen von Drittmittelprojekten durchgeführt. Fragestellungen, Vorgehensweise und Ergebnisse sind jedoch eher abstrakter Natur, weshalb hier auf ein leichter verständliches Anschauungsbeispiel zurückgegriffen wird: Euro-Geldscheine sind mit einer Fülle von winzigen fälschungssichernden Kennzeichen versehen. Eines der weniger bekannten Merkmale ist das trapezförmige Riffelfeld, gleich rechts neben der Unterschrift des Zentralbankprä-

Laserfokus-Messgerät.
3D-Topografiemessung eines 3×3 mm messenden Teilbereichs des Geldschein-Riffelfeldes. An diesem Beispiel wird deutlich, dass Topografiemessungen mit zunehmender Welligkeit der Oberfläche schwerer auszuwerten und schwerer darstellbar sind. Während das menschliche Gehirn keine Probleme hat, in der minimal gekrümmten Oberfläche eines Geldscheins der gestalterischen Geometrie zu folgen, ist dies für die hier eingesetzte Computersoftware erheblich schwieriger



Laserfokus-Messgerät.
3D-Topografiemessung am 10-Euro-Schein, hier als exemplarische Einzelprofil-darstellung. Im Diagramm lässt sich beispielsweise ablesen, das die roten Linien ca. $40 \mu\text{m}$, d. h. rund $1/25$ mm hoch sind (Fotos: BLfD, Martin Mach)



Links: Das trapezförmige Riffelfeld auf der Vorderseite eines 10-Euro-Scheins (Originalgröße ca. $4,5 \text{ mm} \times 13,5 \text{ mm}$, Linienabstand $0,32 \text{ mm}$) in der Lupefotografie. Die Fotografie erlaubt lediglich Spekulationen über die Tiefenstaffelung und wird durch die farbliche Gestaltung verunklärt

Rechts: Silikonabdruck vom Riffelfeld. Als Abformmasse diente ein ultrafein abbildendes, grünes Polyvinylsiloxan-Präparat aus dem Zahnarztbedarf mit dem merkwürdigen Produktnamen „President light body“. Man beachte, dass der hier gezeigte Abdruck ein Negativbild darstellt, bei dem die Grenzlinien zwischen Farbe und Papier dem Betrachter zugewandt sind und deshalb sehr scharfkantig erscheinen, während die nun in der Tiefe liegenden, eher rundlich geformten Farblinien-Oberkanten im Hinblick auf ihre Geometrie anhand des Fotos kaum mehr interpretierbar sind (Fotos: BLfD, Martin Mach)

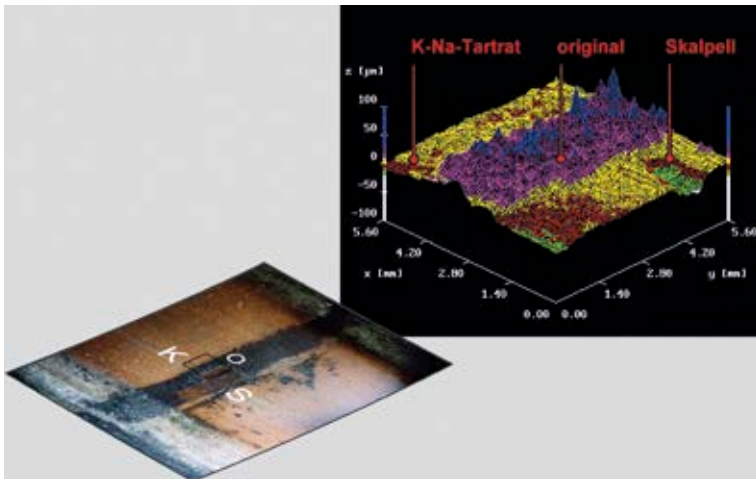
sidenten, welches beim Überstreifen mit dem Fingernagel ein charakteristisches Geräusch erzeugt. In der klassischen Lupenfotografie erscheint das visuelle Gemenge aus topografischen und farblichen Merkmalen ausgesprochen flach. Die Oberflächencharakteristik ist bestenfalls andeutungsweise erkennbar und kann auf der Basis des Fotos nicht numerisch erfasst werden. Sie lässt sich jedoch mit den im Folgenden beschriebenen Techniken direkt oder auch auf dem Umweg über einen vermittelnden Silikonabdruck vermessen und schließlich als räumliches 3D-Modell oder Einzelprofil darstellen.

Anwendungsbeispiel: Bronzetür am Augsburger Dom

Das technisch aufwendige und vergleichsweise teure Laserfokusmessgerät wurde mit Drittmitteln beschafft und in den ersten Jahren ausschließlich für die im Zentrallabor ausgeführte Korrosions-Grundlagenforschung in den europäischen Drittmittelprojekten eingesetzt. Es zeigte sich jedoch bald, dass es auch für angewandte denkmalpflegerische und restaurato-

rische Fragestellungen hilfreich sein könnte. So stellte sich beispielsweise bei der Restaurierung der Augsburger Bronzetür aus dem 11. Jahrhundert (vgl. Denkmalpflege Informationen, Ausgabe B 131, 2005, S. 9–13) die Frage, ob unter Umständen chemische Mittel statt der üblichen mechanischen Freilegemethoden in Frage kommen könnten. Die Metallrestauratorinnen Kerstin Brendel und Brigitte Diepold hatten im Vorfeld der Augsburger Restaurierung festgestellt, dass die auf der Bronzetür aufliegenden Krusten – im Wesentlichen aus Gips und Altkonservierungsresten bestehend – eine weitgehend intakte Kupferoxidpatina verdeckten, die eine flächig durchgehende, weitgehend originale Oberflächengeometrie samt feinen handwerklichen Gestaltungsmerkmalen aus der Entstehungszeit aufwies. Bei der Entfernung ebenfalls unerwünschter Sulfate auf den Florentiner Paradiestüren waren mit sehr gutem Erfolg komplexierend wirkende Chemikalien (insbesondere Kaliumnatriumtartrat) zum Einsatz gekommen.

An Hand der mittels 3D-Topografiemessung untersuchten, kleinformatigen



Kleine Freilegungs-Musterfläche, angefertigt während der Vorarbeiten zur Restaurierung der Augsbürger Bronzetür. Die Musterfläche auf einer Randleiste der Bronzetür ist dreigeteilt: K steht für chemische Freilegung mit Hilfe von Kaliumnatriumtartrat, O für die originale Oberfläche mit aufliegenden Verkrustungen, S für eine rein mechanische Freilegung mittels Skalpell (Musterfläche und Musterflächenfoto: BLfD, Brigitte Diepold und Kerstin Brendel)

tigen Musterflächen an der Augsbürger Bronzetür wird deutlich, dass das matte, etwas verwitterte erscheinende Aussehen der Oberflächen vor der Restaurierung (verkrustete Ablagerungen) mit einer hohen Rauheit einhergeht.

Die mechanisch mittels Skalpell freigelegte Probenfläche ist offenkundig sehr viel glatter. Sie offenbart weiterhin die charakteristische Wirkungsweise einer Skalpellfreilegung: Bei entsprechend sorgfältiger Arbeitsweise, unterstützt durch eine Kopflupe, wird die

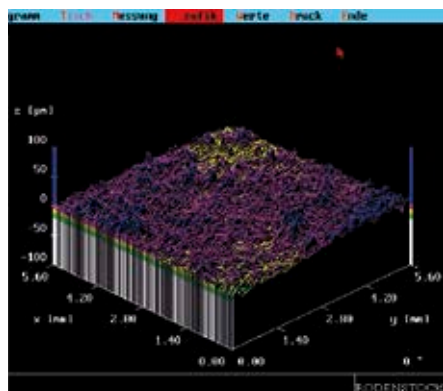
exzellente Kupferoxydoberfläche erfreulich selektiv freigelegt. Das Skalpell erzeugt auch keine nachweisbaren Kratzer. In der mikrometergenauen Betrachtung ist allerdings eine neu eingebrachte, minimale Welligkeit wahrnehmbar, die sozusagen die Handschrift des Skalpells erfasst. Die chemische Freilegung wiederum folgt sozusagen gnadenlos chemisch den stofflichen Gegebenheiten der Korrosion, arbeitet diese sogar noch deutlicher heraus, ohne auf die mutmaßliche ursprüngliche Gestaltung Rücksicht zu

nehmen. Die Messungen lieferten somit im Falle der Augsbürger Bronzetür zusätzliche Informationen zur Charakteristik der zur Diskussion stehenden Methoden, naturgemäß ohne eine Entscheidung vorwegzunehmen.

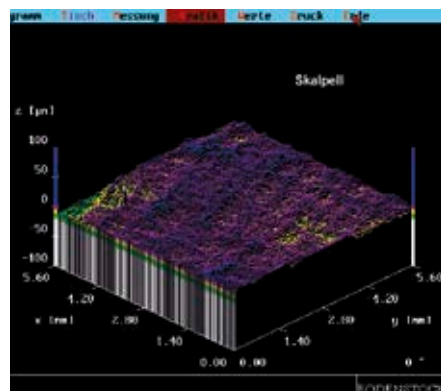
Zusammenfassung

Topografie- und Rauheitsmessungen lösen eine Reihe von Aufgabenstellungen, bei denen andere gängige Methoden wie z. B. die klassische Fotografie, versagen. Sie sind besonders gut geeignet, um feine Oberflächengeometrien, vorzugsweise an annähernd ebenen Oberflächen, zu charakterisieren, insbesondere auch deren Veränderungen zu dokumentieren. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise Werkzeug-Oberflächeneinwirkungen oder verhältnismäßig geringfügige Korrosionsschäden (z. B. Lochfraßvolumina) visualisieren und quantifizieren. Die 3D-Mikrotopografie- und Rauheitsmessung kann bei der Beurteilung von Oberflächen als wertvolles, ergänzendes Hilfsmittel dienen. Zu diesem Zweck müssen allerdings Funktionsweise, Möglichkeiten und Grenzen der Methoden in den Köpfen präsent sein. Die Messungen können in einfachen Fällen direkt vor Ort, aber auch indirekt, mit Hilfe von Silikonabdrücken im Labor ausgeführt werden.

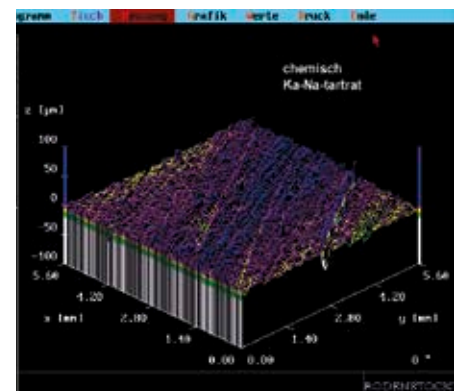
Martin Mach



Musterfläche wie oben, 3D-Topografiedarstellung der verkrusteten Oberfläche im Vorzustand. Messfeldgröße 5,6 × 5,6 mm. Im Vergleich mit dem Skalpell ist die größere Rauheit der verkrusteten Oberfläche erkennbar (Alle Fotos: BLfD, Martin Mach)



Musterfläche wie oben, 3D-Topografiedarstellung des mittels Skalpell freigelegten Oberflächenbereichs. Messfeldgröße 5,6 × 5,6 mm. Die präzise mechanisch freigelegte Oberfläche erweist sich als erstaunlich eben: Ihre Höhen und Tiefen weichen über das gesamte Messfeld hinweg nur etwa mit ±1/100 mm (!) von einer ideal planen Ebene ab. Typische Oberflächencharakteristik einer hervorragend erhaltenen Bronzeoberfläche



Musterfläche wie oben, 3D-Topografiedarstellung des mit Hilfe einer Kaliumnatrium-Tartratlösung chemisch freigelegten Oberflächenbereichs. Messfeldgröße 5,6 × 5,6 mm. Das Tartrat wirkt rein chemisch, betont vorhandene Unebenheiten. Sozusagen chemisch objektiv, aber gleichzeitig im Hinblick auf das Objekt auch absolut unvoreingenommen, quasi blind und vielleicht deshalb ästhetisch weniger befriedigend