

# Form- und Geometriemessung - Aspekte für die Qualitätskontrolle von Mikro- und Nanostrukturen

Heinz-Peter HIPPLER, Dipl.-Ing.(FH) Physikalische Technik  
( International Business Development & Education, [www.b4b2b.eu](http://www.b4b2b.eu) )

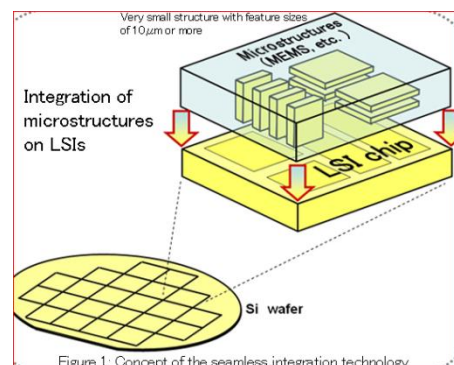
**Kurzfassung.** Einen wesentlichen Teil der Qualitätskontrolle nimmt die Form- und Geometriemessung ein. Dabei spielen optische Messverfahren eine wichtige Rolle. Tendenziell verlagert sich die Qualitätskontrolle in Richtung Fertigung und Produktionsabläufe. Durch Integration in den Herstellprozess werden Ausschuss und Nacharbeit weiter minimiert. Als Querschnittstechnologie hat die Mikro- und Nanotechnik großen Einfluss auf Entwicklung und Anwendung der optischen Messverfahren. Rauheit, Aussehen und Haptik einer Oberflächenstruktur sind wichtige Kriterien, die quantitativ zu bewerten sind. Einige Verfahren, die industrielle Anwendung finden, werden in diesem Beitrag vorgestellt.

## Einführung

In der Fertigungstechnik geschieht seit Jahrzehnten ein Wandel aufgrund der Entwicklungen in der Mikro- und Nanotechnik. Komponenten, Module, Baugruppen, Systeme und Geräte erfahren tiefgreifende Veränderung in der Art wie sie hergestellt und bearbeitet werden. Insbesondere die Mikroelektronik hat bedeutend zum Fortschritt beigetragen.

Das serielle Zusammensetzen von Einzelteilen, die zuvor mechanisch bearbeitet wurden, wird durch mikrotechnische Produktionstechniken abgelöst.

Im Folgenden werden einige Aspekte, die hinsichtlich der Qualitätskontrolle wichtig sind, aufgegriffen. Mikro- und Nanotechnologie-Produkte sind meistens sehr komplex und erfordern ein erweitertes Messtechnik-Verständnis. Des Weiteren werden optische Messverfahren beschrieben, die zur Form- und Geometriemessung auch industriell eingesetzt werden. Insbesondere geht es um die Qualitätskontrolle von Mikro- und Nanometerstrukturen.



## Begriffe und Definition

Wenn die funktionsbestimmenden Dimensionen im Sub-Millimeter-Bereich liegen sprechen wir von Mikrotechnologie oder auch Nanotechnologie. Die Begriffe Nanotechnologie und Nanotechnik werden selbst unter Fachleuten nicht einheitlich verwendet.

Im weitesten Sinne bezeichnet Nanotechnologie die Forschung und Anwendung aller Techniken, bei denen die Strukturen und Teilchen in Dimensionen von einigen Nanometern von Bedeutung sind. Das können neben nano-skalierten Strukturen auch Partikel oder Fasern sein, deren Durchmesser wenige Nanometer betragen. Eine engere Begriffsfassung der

Nanotechnologie definiert diese jedoch nicht einfach nur durch die geometrischen Dimensionen, sondern betrachtet die besonderen Eigenschaften dieser Objekte ebenfalls.

*Die Nanotechnologie befasst sich mit der kontrollierten Herstellung, Analyse und Nutzung von Materialien und Komponenten mit funktionsrelevanten Strukturgrößen zwischen ca. 1 Nanometer und 100 Nanometer in mindestens einer Richtungsdimension. Dabei resultieren aus der strukturellen Nanoskaligkeit neue Funktionalitäten und Eigenschaften, die zur Verbesserung bestehender oder zur Entwicklung neuer Produkte und Anwendungen beitragen können.*

Von Mikrotechnik oder Mikrotechnologie sprechen wir in Analogie zum Vorgenannten, wenn die funktionsrelevanten Größen im Bereich zwischen 1mm und 0,1 µm liegen.

### Wirtschaftliche Bedeutung

In den vergangenen 15 Jahren hat sich die Mikrotechnik, insbesondere Mikrosystemtechnik zu einem Multimilliarden-Euro-Markt entwickelt. Beeindruckend ist neben dem enormen Marktpotential mit anhaltend 2-stelligen Wachstumsraten auch die wirtschaftlich-technische Hebelwirkung. Zahlreiche Makroprodukte profitieren von der Machbarkeit im Mikro- und Nanometerbereich und von der Akzeptanz sowohl im Privaten wie in der Industrie. Die Innovationskraft der Mikro- und Nanotechnologie ist für die deutsche Wirtschaft eine Triebfeder im internationalen Wettbewerb.

Miniaturisierung und hohe Integrationsdichte bewirken den Erfolg dieser Technologie. Rohstoffsparend und energiesparend beanspruchen die Komponenten sehr wenig Platz. Viele Mikro-Bauteile werden im Batch-Processing hergestellt. Ähnlich wie bei der Mikrochip-Herstellung passen abertausende Komponenten auf einen Wafer. Die Leistungsfähigkeit und die Funktionsvielfalt der hochintegrierten Mikrosysteme sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft und wir dürfen auf die zukünftigen Produkte gespannt sein.

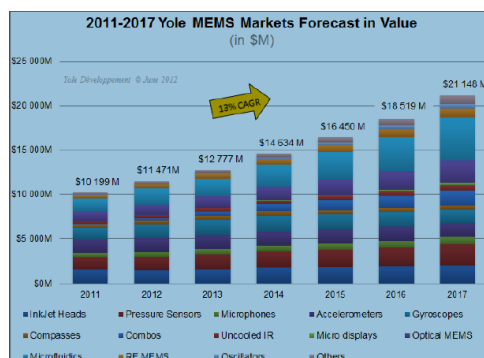
### MEMS, MOEMS, NEMS

Relativ gute Prognosen der Wirtschaftskraft gibt es aus dem Bereich der MEMS, der Mikro-Elektro-Mechanischen-Systeme. MEMS lassen sich generell billig und in Massen fertigen, wie Halbleiter. Es kommen für viele MEMS die CMOS-Fertigungsverfahren zum Tragen, wie bei integrierten Schaltungen.

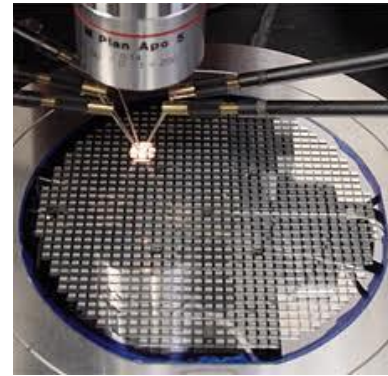
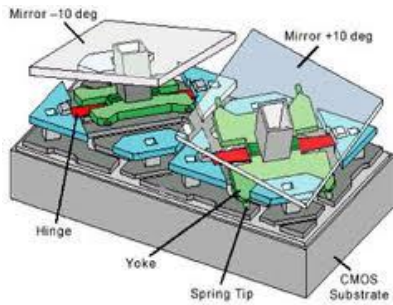
Die weltweite Akzeptanz modernen Kommunikationsmittel ist neben der Automobiltechnologie der größte Antrieb für die Mikro- und Nanotechnologie.

LapTop, Notebook, Tablet-PC, Smart-Phone, Smart-TV, Navi und Co sind nicht mehr wegzudenken. Leistung, Performance und Speicherdichten, die dem Consumer vor einem Jahrzehnt noch unmöglich erschienen, erfreuen uns heute tagtäglich. Besonders die IKT Informations- und Kommunikationstechnik mit den gigantischen Stückzahlen haben einen Hype bei der Entwicklung der MEMS ausgelöst.

MEMS, Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme, vereinen Sensor-Elemente mit Mechanik-Strukturen, mit Logik-Elementen und Informationsaufbereitung, mit Oszillatoren und Filtern, mit Aktuatoren und Signalausgang. Alles in einem Mikrobauteil, komplex verschachtelt und auf Wafern gefertigt.



MEMS können auch aus zwei und mehr Chips bestehen. Beispielsweise einer für die Sensorfunktionen und einer für die Signalverarbeitung. CMOS-Anlagen wie sie für die normale Chip-Fertigung konzipiert sind, sind für flache Strukturen gedacht. MEMS haben dagegen 3-dimensionale Strukturen, sind meistens tiefgeätzt, erfordern weitere Fertigungsschritte und / oder besondere Materialien.



Für die Qualitätskontrolle, die Form- und Geometriemessung der Mikro- und Nanostrukturen bedeutet das, dass Messstrategien in aufwendigen Messautomaten zum Einsatz kommen, die in der Regel mehrere optische Messverfahren beinhalten.

Außerhalb der Mikroelektronik-Branche, die ein hochdynamischer Antrieb der Mikro- und Nanotechnologie-Entwicklung ist, spielen die Bereiche Mikrosensorik, Mikroaktuatorik, Mikromechanik, Mikroakustik, Mikrofluidik und Mikroreaktionstechnik eine große Rolle. Dabei gibt es keine scharfen Grenzen zwischen der Mikrotechnik und Nanotechnik. Die Bereiche sind überlappend.

Als Querschnittstechnologie findet die Mikro- und Nanotechnologie in folgenden Industriebereichen lukrative Anwendung: Automobil, Maschinenbau, Medizintechnik, Energie effiziente Techniken, Umweltschutz, Lebensmittel, Kosmetika, AAL Ambient Assisted Living, neue Materialien und Schneidwerkzeuge.

*„Die Möglichkeiten sind nur durch den Ideenreichtum und die Kreativität zur Umsetzung begrenzt“.*

## **Auswirkungen auf die Qualitätskontrolle**

### *Alleinstellungsmerkmale der optischen Messtechnik*

Die Produktionsverfahren, Fertigungstechnologien und Herstellungsprozesse sind in der qualitätsbewussten Industrie immer mit Prüf- und Messverfahren gemeinsam von Bedeutung. Die Entwicklung der Mikro- und Nanomeßtechnik hat ihre Wurzeln vor allem in der Halbleitertechnik. Von dort kamen die wesentlichen Impulse, insbesondere optische Messverfahren zur industriellen Reife zu bringen.

Die optischen Messprinzipien haben einige Alleinstellungsmerkmale gegenüber den klassischen Methoden aufzuweisen. In erster Linie ist ihre Wirkung berührungslos und damit beschädigungsfrei. Es gibt praktisch keine Wechselwirkung zwischen „Messfühler“ und Messobjekt. Nahezu jede beliebige Oberfläche kann gemessen werden. Fast unbegrenzt viele Messstellen sind simultan schnell und hochaufgelöst zu erfassen. Je nach Messaufgabe auch über große Distanzen. In Echtzeit stehen Zustandsmessgrößen der Prozessabläufe zur Verfügung.

Darüber hinaus sind optische Messtechniken sehr gut geeignet sowohl ultraschnelle als auch sehr sehr langsam ablaufende Änderungen zu erfassen. Man spricht auch vom 4D-Messen. Ein weiteres Merkmal ist die flexible Skalierbarkeit. Daten können in atomaren Dimensionen wie auch in astronomischen Dimensionen erfasst werden. Sodann kommt noch die spektrale Eigenschaft hinzu. So kann z. B. ein optischer Sensor in seiner wellenlängenangepassten Empfindlichkeit gezielt auf eine Messaufgabe hin ausgelegt sein.

Kernaufgabe der optischen Messtechnik ist die präzise Längenmessung oder Änderungen derselben infolge Temperatur- und/oder Mechanikeinwirkung. Es läuft meistens auf die 3-dimensionale Form- und Formänderungserfassung hinaus. Besonders zu bemerken ist auch, dass die Zielgröße, die Länge beispielsweise, nicht direkt gewonnen

wird, sondern aus einer Primärgröße resultiert. Primärgrößen sind je nach Messverfahren die Wellenlänge, die Polarisation, die Intensität und der Kontrast.

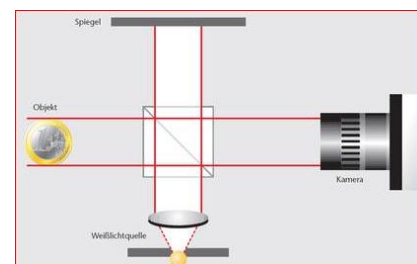
Die Entwicklung der optischen Messtechnik zu einer „Enabling Technology“ begann bereits als die Lichtwellenlänge an die Meterdefinition angeschlossen wurde. Beiträge dazu lieferten auch die Entdeckung der Holographie und die Realisierung der kohärenten Laserlichtquellen.

Zur Auswahl der geeigneten optischen Messtechnik für eine Messaufgabe ist es hilfreich sich zu verdeutlichen welche primäre Messgröße zur Erfassung geeignet ist, welche Zielgröße daraus resultieren soll, welche Lichtquelle verwendet werden kann und in welchem Skalenbereich gemessen wird, sowie ob die Messung statisch oder dynamisch erfolgen soll.

## Eine Auswahl typischer Verfahren der optischen Messtechnik für Mikro- und Nanostrukturen

### Weißlichtinterferometer

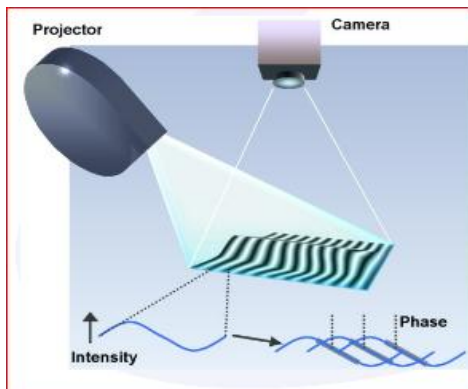
Ein Weißlichtinterferometer nutzt die Überlagerungseffekte von Licht. Die Überlagerung kommt zustande, indem reflektiertes Licht vom Messobjekt mit dem reflektierten Licht von einem Referenzspiegel auf einem flächenhaften Detektor gemeinsam auftrifft. Sind die optischen Wege im Objektstrahl und im Referenzstrahl gleich lang, kommt es zu einem Intensitätsmaximum auf dem Detektor.



Das Verfahren ist geeignet, große Flächen simultan zur erfassen. Die Oberflächenstruktur wird mittels des Weißlichtinterferometers auf seiner CCD-Kamera abgebildet. Pixelsignale gleicher Intensität repräsentieren gleiche Höhen auf der Objekt-Oberflächenstruktur.

### Streifenprojektion

Das Verfahren nutzt die Projektion eines Streifenmusters, schräg einfallend auf die zu erfassende Oberflächenstruktur. Eine Kamera, die unter einem Winkel zum einfallenden Streifenmuster angeordnet ist, nimmt die perspektivische Verformung des Streifenmusters flächenhaft auf. Das Streifenmuster kann in der Phase (Intensität) moduliert werden und in der Musterbreite variiert werden, um auch kleine Details zu erfassen.



Wesentlicher Bestandteil derartiger Messgeräte sind digitale Mikrospiegel-Arrays zur Projektion des Streifenmusters. Ein Flächen-Array mit ca. 2 Mio. Pixeln wird verwendet und gestattet die Erfassung von ausgedehnten Oberflächenstrukturen in kurzer

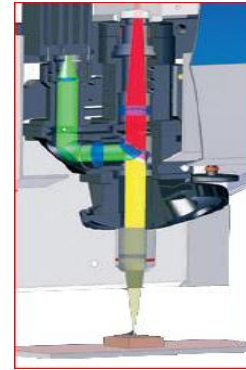
Zeit.

### Fokus-Variation

Beim Fokus-Variation-Verfahren wird die geringe Schärfentiefe eines Objektivs ausgenutzt. Allgemein bekannt ist, dass bei einem Fotoobjektiv vor und hinter dem Fokusabstand (Objektweite) die Bildschärfe abnimmt. Messgeräte für Mikro- und Nanostrukturen, die nach dem Fokus-Variation-Verfahren arbeiten, verwenden Mikroskop-Objektive die ein modulierte Lichtbündel auf die Oberfläche fokussieren. Das reflektierte Licht wird durch dasselbe Mikroskop-Objektiv auf einem Detektor abgebildet.

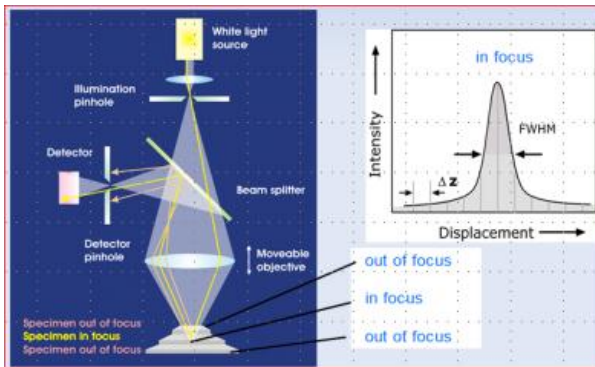
Aufgrund der kleinen Schärfentiefe des Mikroskop-Objektivs werden nur die Bereiche scharf abgebildet, die den „passenden“ Objektabstand haben. Um eine 3D-Messung zu erhalten wird das Objektivgebilde entlang der Schärfentiefe-Achse verschoben. So variieren die Schärfentiefe-Zonen durch die Topographie der Oberflächenstruktur.

Je nach Objektiv-Vergrößerungsfaktor können sehr feine Strukturen aufgelöst werden; lateral auf wenige Mikrometer und transversal auf wenige Nanometer.



### Konfokale Messtechnik

Bei der hier betrachteten konfokalen Messtechnik wird ein Lichtbündel auf eine Lochblende fokussiert, passiert danach einen Strahlteiler und wird von einer Abbildungsoptik auf die Messobjektoberfläche fokussiert. Dort reflektiert das Licht, trifft durch die Optik über die Strahlteilung auf eine weitere Lochblende und danach auf den Detektor. Am Detektor wird die Lichtintensität gemessen. Sie erreicht ein Maximum, wenn die Objektoberfläche genau im Fokusabstand des Strahlengangs liegt. Damit ist der Abstand eines Oberflächenpunktes sehr präzise ermittelt.



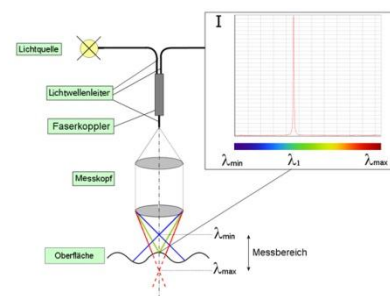
Für die flächenhafte Messung verwendet man anstelle einer Blende mit nur einem Loch eine rotierende Lochscheibe mit unzähligen Löchern. Auf der Detektorseite kommt eine CCD-Matrixkamera zum Einsatz. Je nach Objektivvergrößerung, Größe der CCD-Matrix und den Abbildungsverhältnissen ergibt sich die Größe der simultan betrachteten Oberflächenstruktur.

Die Erfassung der dritten Dimension erreicht man durch schrittweise Variation des Abstandes zwischen Abbildungsoptik und Messobjekt. Laterale Auflösung bis auf Mikrometer und transversale Auflösungen bis in den Nanometerbereich sind möglich.

### Chromatisch-konfokale Messtechnik

Nach dem chromatisch-konfokalen Messverfahren wird die spektrale Eigenschaft des weißen Lichts ausgenutzt. Demnach wird Licht je nach Wellenlänge in gering unterschiedlicher Distanz fokussiert. Trifft ein fokussiertes Lichtbündel auf die Objektoberfläche so wird es dort reflektiert, durchläuft wieder den optischen Weg über einen Strahlteiler auf einen Spektrometer-Detektor; ein Detektor, der die Intensitätsverteilung über die Wellenlänge ermittelt.

Ein kurzer Abstand zum Abbildungsobjektiv ergibt eine hohe Intensität im Blauen, ein langer Abstand ergibt eine hohe Intensität im Roten. Das chromatisch-konfokale Messverfahren erfasst punktwise ohne mechanische Verschiebung der Optiken die transversale Dimension. Zur flächenhaften „Abtastung“ wird der Lichtbündelfokus über die Oberflächenstruktur mäanderförmig gescannt.



## Mikro- und Nanometer-Dimensionen in der technischen Welt

### Mikro und Nano in Relation

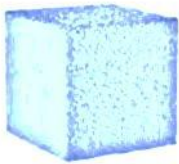
Zur Verdeutlichung wie klein die Nanometer-Welt ist, ist es hilfreich sich die Dimensionen in anderer Relation vorzustellen:

Beispiel: Eine Apfelsine mit 10cm Durchmesser soll 1nm verkörpern. Wollen wir in diesem Maßstab 1m darstellen, dann müssen wir so viele Apfelsinen aneinander legen dass die Apfelsinenkette zweieinhalbmal um den Erdäquator gelegt werden kann. In der Relation wäre 1m nämlich 100.000km lang.

### Besonderheit nano-skaliger Strukturen und Teilchen

Mit der Nanotechnologie wurden auch bisher unbekannte, und teilweise immer noch unerklärte, physikalische Effekte entdeckt. Dabei ist das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen von Bedeutung:

Beispiel: Nehmen wir ein Stück Würfelzucker mit 10mm Kantenlänge, einem Volumen von  $1.000\text{mm}^3$  (1ml) und einer Fläche von  $600\text{mm}^2$ . Zerteilen wir den Zuckerwürfel in 1 Millimeter große Würfelstücke und weiter in 1 Mikrometer große und schließlich in 1 Nanometer große



Würfelstückchen, dann ist das Volumen weiterhin 1ml, aber die Summe aller Nanometer großen Würfelseiten hat jetzt eine Gesamtflächen von  $6.000\text{m}^2$ . Sie ist also vom Drittel einer Visitenkartenfläche auf Fußballfeldgröße angestiegen.

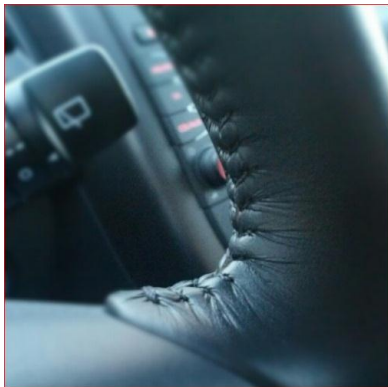


Würfelstückchen, dann ist das Volumen weiterhin 1ml, aber die Summe aller Nanometer großen Würfelseiten hat jetzt eine Gesamtflächen von  $6.000\text{m}^2$ . Sie ist also vom Drittel einer Visitenkartenfläche auf Fußballfeldgröße angestiegen.

## Oberflächenbeschaffenheit und Funktion

Die Oberfläche eines Materials, als „Grenze“ zweier Medien, hat neben ihrer funktionalen Eigenschaften auch noch wesentliche Bedeutung für die Haptik und das Aussehen. Die Oberfläche spielt eine besondere Rolle.

Haptik, Aussehen, Funktion stehen in direktem Zusammenhang mit der Herstellung, mit dem Bearbeitungsprozess, dem Material selbst und seiner Konsistenz.



Gebrauchsgegenstände, die wir anfassen, bewerten wir in erster Linie nach dem persönlichen Eindruck - wie es sich anfühlt - wie es aussieht.

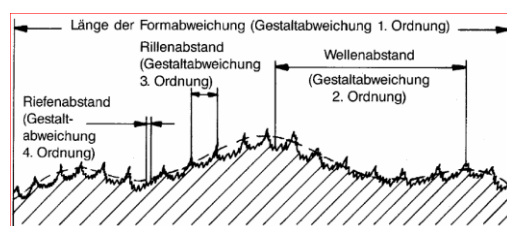


Davon abgesehen haben insbesondere technische Produkte eine Funktion zu erfüllen. Lager- und Gleitflächen im Automobilmotor, in Lenksystemen oder Kraftstoffeinspritzbauteile

beispielsweise bekommen durch die Bearbeitungsprozesse definierte Oberflächenstrukturen, die einer quantitativen Kontrolle genügen müssen.

## Form und Geometrie

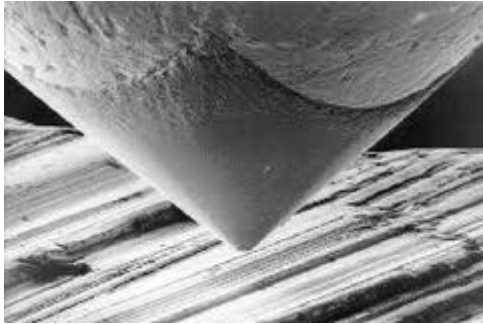
Beschränken wir uns auf die Form und Geometrie von Oberflächen im Mikro- und Nanometerbereich, so beschäftigen wir uns mit der Messung von Abstand, Ebenheit, Welligkeit und Rauheit. Im wesentlichen sind dadurch auch das Funktionsverhalten und die Standzeit beeinflusst.



Unerwünschte Welligkeiten, z. B. können zu lästigen Geräuschen führen. Durch unpassende Rauheit tritt erhöhter Verschleiß auf oder es kommt zu schwerwiegenden Funktionstörungen.

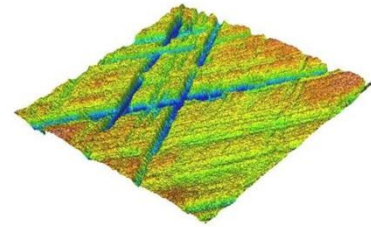
### Die Rauheitsmessung

Profil-Tastschnittverfahren sind das Übliche zur Rauheitsmessung. Allerdings stoßen diese Verfahren an ihre Grenzen bei den Mikrometer-Dimensionen. In den Normen sind z. B. Mindestmessstrecken festgelegt, die für eine normgerechte Rauheitsaussage mechanisch abgetastet werden müssen. Das Tastverfahren nimmt eine Schnittlinie auf, die relativ zufällig auf der zu beurteilenden Fläche ausgewählt wird. Und, das Abgreifen der Rillen und Zacken erfolgt mit einer Krafteinwirkung auf das Material. Die Auflagekraft ist zwar sehr gering, aber vorhanden. Die Tastspitze ist zudem mehrere Mikrometer groß.



Daraus ergeben sich Beschränkungen, die nach heutigem Technikstand insbesondere bei Mikrometer-Dimensionen nicht mehr hingenommen werden müssen.

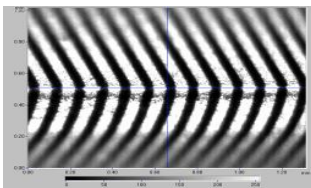
So kommen heute für die Rauheitsmessung an Mikro- und Nanometerstrukturen vorwiegend optische Messgeräte zum Einsatz. Diese sind zudem in der Lage flächenhafte Rauheitsmessung durchzuführen. Damit ist die Zustandsaussage um ein vielfaches besser als die „zufällige“ Profilschnittmessung. Außerdem ermöglichen die optische Messtechnik transparente Schichten zu messen, sowie an gekrümmten und Freiform-Flächen zuverlässige reproduzierbare Messresultate zu erhalten.



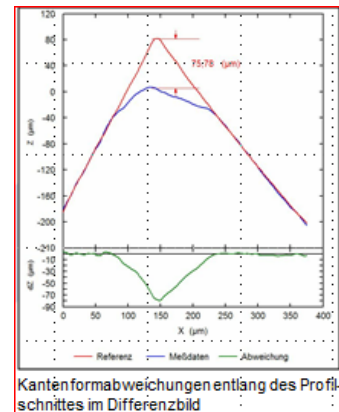
### Anwendungsbeispiele

#### Schneidwerkzeuge, Beschichtung und Schneidkante

Bei Schneidwerkzeugen ist die Beschichtung von Bedeutung. Die Gleichmäßigkeit des Auftrags wirkt sich auf die Standzeit aus.



Aber auch die Schneidengeometrie ist ausschlaggebend, einerseits für die Haltbarkeit und andererseits für die erzielbare Oberflächengüte der zu bearbeitenden Werkstücke. Hier eignen sich Streifenprojektionsverfahren sehr gut.

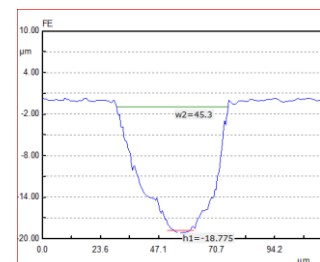
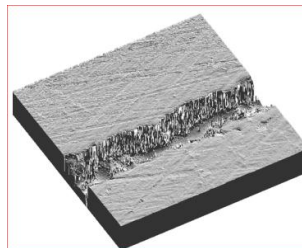


fahren sehr gut.

#### Pleuel und Zylinderlaufflächen, Ölrückhaltevermögen

Hochbeanspruchte Flächen wie Pleuellager und Zylinderlaufflächen im KFZ-Motor müssen zuverlässig bei hoher Last lange Stand halten. Auf der

Lauffläche der Zylinderbohrung ist ein Merkmal das sogenannte Ölrückhaltevermögen. Bei der Auf- und Abbewegung des Kolbens soll nicht zu viel und nicht zu wenig Öl an der Wand haften bleiben. Dazu geht man seit einiger Zeit dazu über,

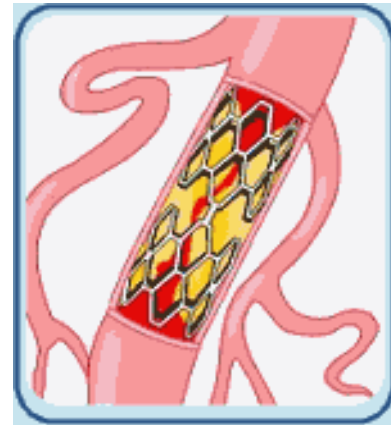
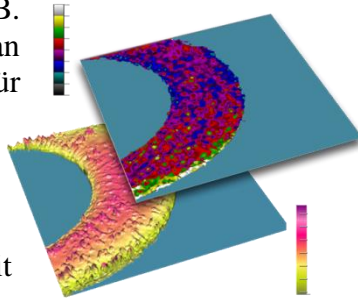


Ölrückhaltetaschen im Wendepunktbereich des Kobens auf der Zylinderwand einzubringen. Mittels Laser werden in Umfangsrichtung in parallelen Bahnen Vertiefungen eingebracht, die ca. 20µm tief, 40µm breit und 3mm lang sind.

*Implantate, Rauheit und Bio-Schicht*

Die Mikro- und Nanotechnologie hält vielfach Einzug in die Medizintechnik. Minimalinvasive Eingriffe sind durch miniaturisierte Instrumente einerseits und High-Tech-Bildgebungsverfahren andererseits, die ebenfalls von der Mikro-/Nanotechnologie profitieren, in höherem Maße möglich als noch vor 10 Jahren. Patientenmonitoring ist durch High-Tech erheblich verbessert und für den Patienten erträglicher geworden.

Messtechnische Aufgaben, Form und Geometrie betreffend, finden wir z. B. für Schichtdicken an biologischen Coatings, für Formmessungen an Kanülen, Spritzen und Schneiden sowie für Rauheit an Implantaten.



Die Gleichmäßigkeit der Bio-Beschichtung an Stents ist ein wichtiges Merkmal für deren einwandfreie und langanhaltende Funktion in Blutbahnen, Speiseröhre, Harnleitern und Darm.

Implantate für Zahnersatz oder Hüft- und Kniegelenke werden aus hochwertigen Materialien hergestellt. Sie sollen sehr lange im Körper verbleiben und dort mit dem umgebenden Knochen- und Knorpelgewebe eine mechanische und / oder biologische Verbindung eingehen. Selbstverständlich muss die Form-Geometrie stimmen und Knick- sowie Drehbewegungen ungestört zulassen. Kritischer ist allerdings die „Verankerung“. Hier kommt es sehr genau auf die Rauheit der Oberflächen an. Wegen der gekrümmten Freiform-Oberflächen von Implantaten sind hier die neuen

optischen Messtechniken den konventionellen taktilen Techniken weit überlegen.

Zur Formmessung kommen Geräte zum Einsatz, die auf dem Wirkprinzip der Interferometrie und der Streifenprojektion basieren. Für die Rauheitsmessung sind Geräte nach dem Konfokal-Prinzip oder dem Chromatisch-Konfokal-Prinzip sehr gut geeignet.

