

Neue taktile Sensoren für die Mikro- und Nanotechnik

New Tactile Sensors for Micro- and Nanotechnology

Uwe Brand, Vladimir Nesterov, Lutz Doering, Sebastian Bütetisch, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig,
Erwin Peiner, Stephanus Büttgenbach, TU Braunschweig,
Joachim Frühauf, TU Chemnitz

Prof. Dr. Wilkening zum 65. Geburtstag gewidmet

Zusammenfassung Dimensionelle Messungen an Bauteilen der Mikrosystemtechnik waren aufgrund des Fehlens größenangepasster Antastelemente lange Zeit nicht möglich. Zwei neue Mikrotastsysteme auf der Basis von piezoresistiven Siliziumsensoren stehen nun zur Verfügung und können für Präzisionsmessungen eingesetzt werden. Durch die Vielfalt der zu messenden Materialien, unter denen etliche eine geringe Härte aufweisen, kommt der elastischen wie plastischen Deformation beim Messen große Bedeutung bei. Vermeiden lassen sich diese systemischen Abweichungen oder die Kratzer nur durch die Verwendung kleiner Antastkräfte. Der Beitrag beschreibt die entwickelte Mikrokräftmesstechnik und gibt einen Ausblick auf die in Entwicklung befindliche Nanokräftmesstechnik, die für entsprechende rasterkräftmikroskopische Präzisionsmessungen erforderlich ist. Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeiten erstreckt sich auf die Modellierung der Deformationen beim

taktilen, rasternden Messen. ▶▶▶ **Summary** Due to the lack of size-adapted probing elements, it has for a long time not been possible to conduct dimensional measurements on components of microsystem technology. Two new microprobing systems on the basis of piezoresistive silicon sensors are now available and can be used for precision measurements. Due to the diversity of materials to be tested (quite a few of them have a low hardness), the elastic and plastic deformation during the measurement is of great importance. These systematic deviations and the scratches can be avoided only by the use of small probing forces. The paper describes the microforce measuring techniques developed and gives the prospects for nanoforce metrology which is at present under development and which is required for scanning force microscopic precision measurements. A focal point of the research activities concerns the modelling of the deformations during tactile scanning measurements.

Schlagwörter Mikrokräft, Nanokräft, Kraft-Einstellnormale, Deformation, Antastkraft, Mikrotaster ▶▶▶ **Keywords** Micro force, nano force, force setting standard, deformation, probing force, micro probe

1 Einleitung

Zahlreiche Aufgaben der dimensionellen Messtechnik (Mikrobauteile, Dieseleinspritzdüsen, Glasfasersteckverbinder) erfordern den Einsatz taktiler Mikromesstechnik. Die Gründe für die Wahl taktiler Messverfahren liegt dabei vorwiegend in der Unzugänglichkeit dieser Strukturen für optische Messtechnik oder aber in der Nichtanwendbarkeit optischer Methoden. Eine besondere Anforderung stellt die geringe Größe der zu

messenden Strukturen dar. Einspritzdüsen in heutigen Dieselfahrzeugen stellen mit Durchmessern von 100 µm und einer sich nach innen aufweitenden Form eine Herausforderung dar. Das größte Potenzial für die Entwicklung sehr kleiner Tastsysteme hat die Mikrotechnik. Mit der Silizium-Mikrotechnik verfügt dieses Fertigungsverfahren zudem über ein Material mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften wie geringem thermischen Längenausdehnungskoeffizienten,

großer Härte, geringer Rauheit der Oberfläche und perfekter Elastizität. Diese Eigenschaften wurden zur Herstellung von Sensoren (3D-Bossmikrotaster, Cantilevertaster, 1D-Kammantriebskraftsensor [1–3]) und Maßverkörperungen (Tiefeneinstellnormale, Längennormale, Mikrokraftnormale [4–6]) genutzt. Im Folgenden werden diese Sensoren und Maßverkörperungen sowie die in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt entwickelte Messtechnik zur Charakterisierung und Kalibrierung vorgestellt.

Eine weitere Herausforderung für die Qualitätssicherung von Mikrosystemen ergibt sich durch den Einsatz zahlreicher neuer Materialien. So erfordern insbesondere die relativ weichen Polymere beim taktilen Messen sehr viel geringere Antastkräfte. Auf die systematischen Messabweichungen aufgrund von Deformationen beim Messen neuer Materialien wird im letzten Kapitel dieses Beitrages näher eingegangen.

2 Neue Mikrotaster

In diesem Kapitel werden drei innovative Mikrotastsysteme beschrieben: ein piezoresistiver 3D-Mikrotaster auf Basis einer Si-Bossmembran, ein piezoresistiver 1D-Rauheitssensor, basierend auf einem Si-Biegebalken, und ein 1D-Kammantrieb, basierend auf zwei ineinandergreifenden Si-Kämmen und elektrostatischer Kräfteerzeugung, der sowohl als Aktor als auch als Kraftsensor eingesetzt werden kann.

2.1 3D-Bossmikrotaster

Der piezoresistive 3D-Mikrotaster wurde in einer Kooperation des Instituts für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig und der PTB entwickelt und die Technologie anschließend in die Industrie transferiert [7]. Der Taster ist für Koordinatenmessgeräte kommerziell erhältlich [8] und kann im kalibrierten Zustand auch als 3D-Kraftsensor verwendet werden.

Der Mikrotaster besteht aus drei Komponenten: der Si-Bossmembran, dem Taststift und der Tasterhalterung. Die Bossmembran wird mikrotechnologisch hergestellt und anschließend der Taststift auf dem Boss fixiert

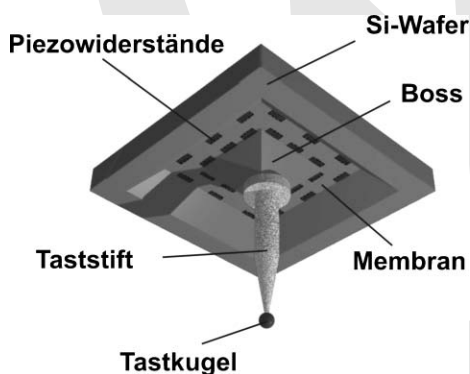


Bild 1 3D-Mikrotaster mit piezoresistiver Sensorik.

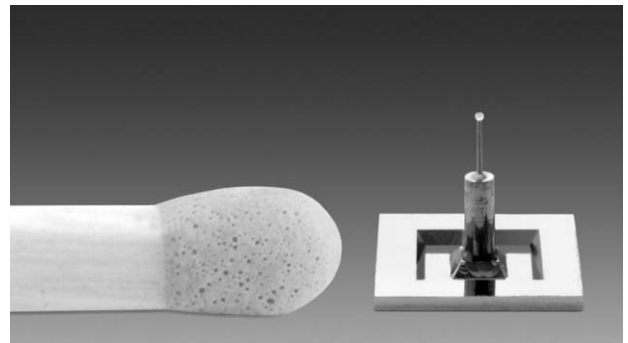


Bild 2 Größenvergleich 3D-Mikrotaster mit Zündholz.

(s. Bild 1). Die kleinsten Tastkugeln, die zurzeit kommerziell verfügbar sind, haben einen Durchmesser von kleiner 100 μm . In die Bossmembran sind Piezowiderstände eingebracht, die zu drei Wheatstone'schen Brücken verschaltet sind. Die Ausgangssignale dieser drei Brücken sind proportional zur Auslenkung des Taststiftes in je eine der drei Raumrichtungen.

Die Tasterausgangssignale als Funktion der Auslenkung der Tastkugel werden mit Hilfe einer Mikrokraftmesseinrichtung kalibriert. Unter optimalen Bedingungen beträgt die Auflösungsgrenze für Auslenkungen 0,06 nm und die Auflösungsgrenze für Kräfte 0,6 μN (in einer Bandbreite von 80 Hz) [9].

2.2 Piezoresistiver 1D-Rauheitssensor

Eindimensionale Rauheitssensoren, basierend auf langen, schmalen Silizium-Biegebalken (Cantilever) mit integrierten Spitzen und integrierter piezoresistiver Sensorik für die Messung von Mikrostrukturen mit großem Aspektverhältnis, wurden von der PTB in Kooperation mit dem Institut für Halbleitertechnik der Technischen Universität Braunschweig entwickelt (s. Bild 3) [10]. Mit einem Industriepartner wurde die Technik weiterentwickelt mit dem Ziel, den Taster kommerziell verfügbar zu machen. Der 1D-Mikrotaster kann zur Messung der Form und Rauheit kleiner Bohrungen eingesetzt werden. Mit Prototypen 5 mm langer Sensoren wurde ein schrotrauschbegrenzt (Johnson-Rauschen) Rauschniveau von $10 \text{ nV}/(\text{Hz})^{0,5}$ bei Frequenzen oberhalb von

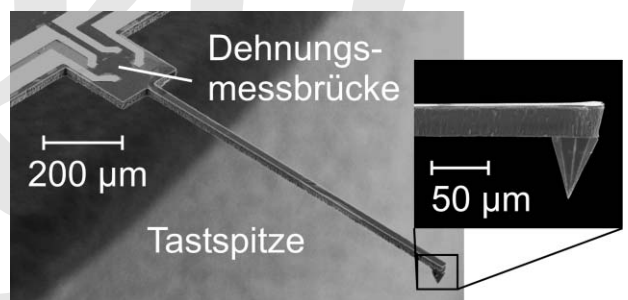


Bild 3 Foto des piezoresistiven 1D-Rauheitssensors.

article is protected by German copyright law. You may copy and distribute this article for your personal use only. Other use is only allowed with written permission by the copyright holder.

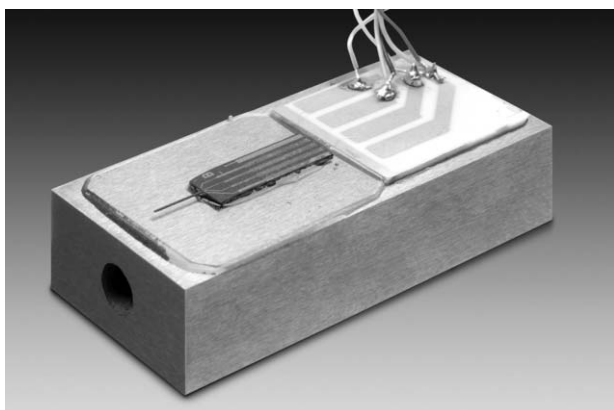


Bild 4 Kraftsensor, basierend auf dem piezoresistiven 1D-Rauheitssensor.

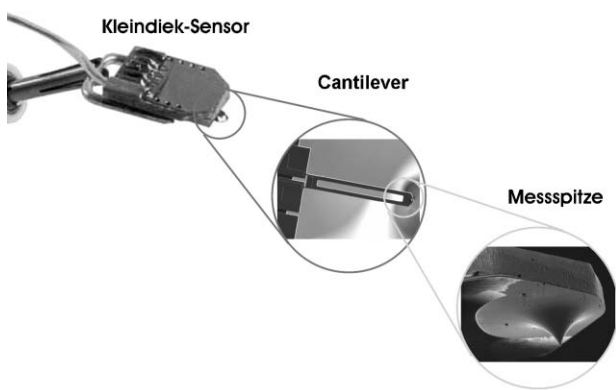


Bild 5 Kommerziell erhältlicher Cantilever-Mikrokraftsensor [12].

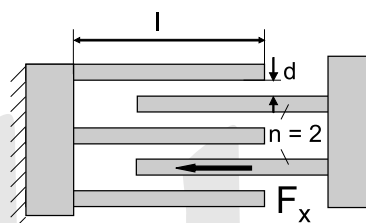
100 Hz erreicht [11]. Daraus ergibt sich eine Auslenkungsaufösung von 0,1 nm in einer Bandbreite von 1 Hz.

Der Sensor kann ebenfalls als Mikrokraftsensor genutzt werden. Dazu wird er auf eine Glasplatte geklebt und die elektrischen Kontakte der piezoresistiven Wheatstone-Brücke auf eine keramische Kontaktplatte gebondet (s. Bild 4). Nach Kalibrierung des Ausgangssignals, der Auslenkung und der Antastkraft kann der Sensor zur Messung der Antastkraft von Tastschnittgeräten – hier beträgt die erforderliche Einstellkraft nach ISO 3274 750 μN – oder anderer taktile arbeitender Geräte verwendet werden. Typische Steifigkeitswerte (Antastkraft/Auslenkung) der 5 mm langen Sensoren liegen bei 10 N/m und der maximale Auslenkungsbereich von 500 μm führt zu einem Kraftmessbereich von 5 mN. Die Kraftauflösung beträgt 36 nN und die erreichbare Kraftmessunsicherheit einige Prozent.

Ein ähnlicher Cantilever-Sensor ist seit einiger Zeit kommerziell erhältlich [12] (s. Bild 5). Der Sensor ist mit zwei unterschiedlichen Steifigkeiten von 2 N/m und 40 N/m und entsprechend zwei unterschiedlichen Messbereichen von 80 μN und 360 μN erhältlich. Hier ist der Cantilever 400 μm bzw. 120 μm lang, 50 μm breit und 4–5 μm dick; der Radius der Spitze ist < 20 nm und die Spitzenhöhe ist > 5 μm .

2.3 1D-Kammstruktur-Kraftsensor

In der PTB wurde ein elektrostatischer Kammantrieb (s. Bild 6) für die Nanoindentation entwickelt (s. Beitrag K. Herrmann et al. in diesem Heft). Die Aktoren wurden von der TU Chemnitz mittels DRIE-Technologie hergestellt. Der Antrieb besteht aus ineinander verschränkten Kammstrukturen, von denen eine fest und die andere beweglich ist. Die von jedem Kammpaar während der elektrischen Aktuation erzeugte Kraft ist proportional zur Kammhöhe h , zum Quadrat der Anregungsspannung U und umgekehrt proportional zum Kammabstand d . Der Kammantriebsaktor kann nicht nur zur Erzeugung von Nanokräften und Verschiebungen im nm-Bereich,



$$F_x = e_0 \frac{h \cdot U^2}{2d} n$$

Bild 6 Prinzipskizze des elektrostatischen 1D-Kammantriebs (h : Kammhöhe).

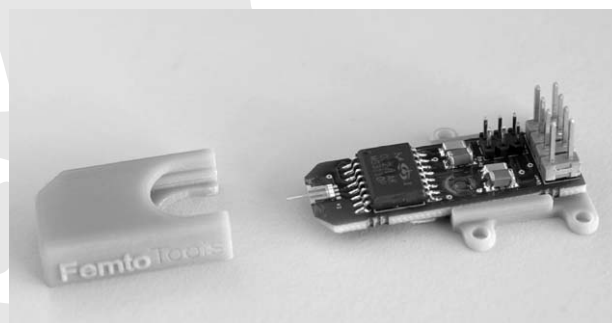


Bild 7 Kommerziell erhältlicher Kammstruktur-Kraftsensor [13].

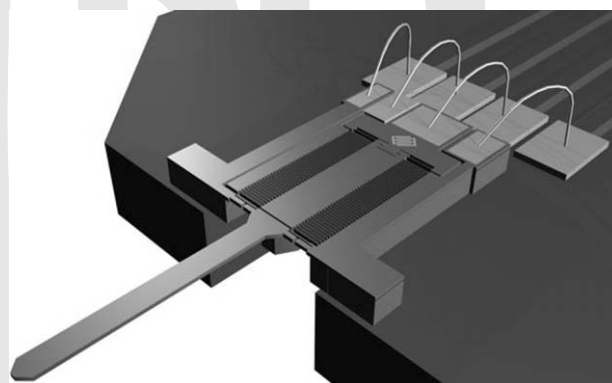


Bild 8 Detailskizze des Kammstruktur-Kraftsensors mit Stift zur Krafteinleitung in Achsrichtung des Stiftes.

sondern auch als Wegsensor mit Nanometerauflösung verwendet werden. Ein weiterer metrologischer Vorteil ist seine lineare Bewegung im Vergleich zur Kreisbewegung von Cantilever- und Bossensoren.

Sensoren mit zwei unterschiedlichen Messbereichen von 160 μN und 2000 μN sind bereits kommerziell erhältlich [13] (s. Bilder 7 und 8). Die mechanischen Resonanzfrequenzen betragen 1 kHz bzw. 3 kHz, die Auflösung 0,3 μN bzw. 2 μN bei 1 kHz Bandbreite und 0,05 μN bzw. 0,4 μN bei 30 Hz Bandbreite.

3 Die Kalibrierung kleiner Kräfte

Die Technik der Mikrokräftkalibrierung von Cantilever- und Bossensoren mit Hilfe von Kompensationswaagen und hoch auflösenden Positioniertischen wurde in der PTB entwickelt [14]. Zugrunde liegende Idee des Verfahrens ist, dass die Auslenkung der zu kalibrierenden Sensoren ihrer Verschiebung in Richtung der Kompensationswaage während des Antastvorgangs entspricht und auf die sehr schwierige direkte Messung der Sensorauslenkung verzichtet werden kann (s. Bilder 9 und 10). Dies ist

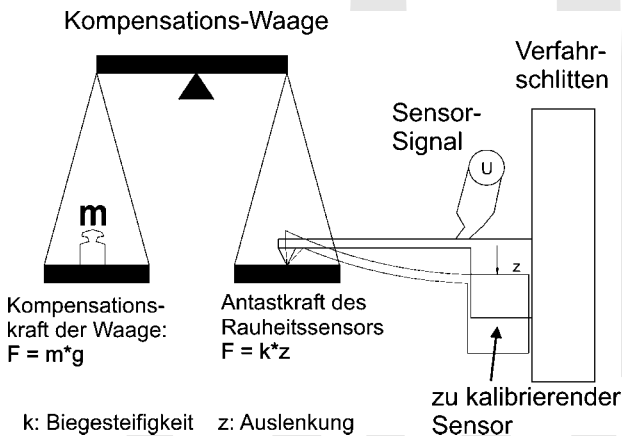


Bild 9 Prinzip der Mikrokräftkalibrierung mit Hilfe einer Kompensationswaage und einer Nanopositioniereinheit.

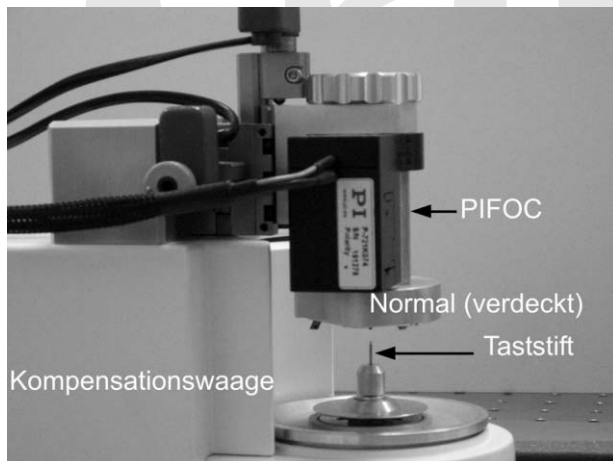


Bild 10 Foto der Mikrokräftkalibriereinrichtung der PTB.

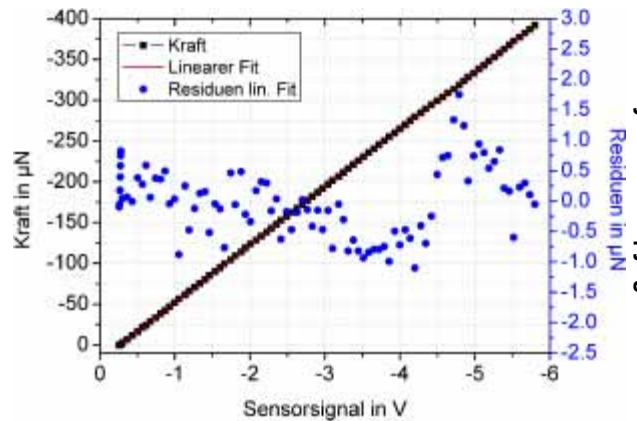


Bild 11 Kalibrierkurve eines Cantilever-Mikrokräftsensors mit Residuen des linearen Fits.

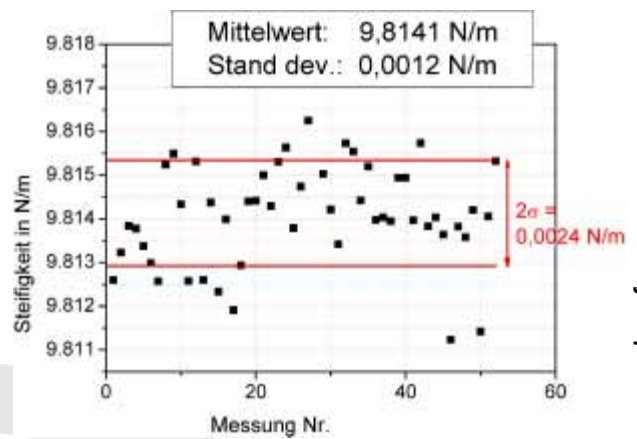


Bild 12 Ergebnis einer Steifigkeitskalibrierung.

möglich, weil sich die Position der Waagschale während des Antastens der Waage nicht ändert – eine Eigenart von Kompensationswaagen.

Bild 11 zeigt ein typisches Ergebnis einer Mikrokräftsensor-Kalibrierung. Das Sensorausgangssignal des piezoresistiven Cantilever-Kraftsensors ist linear bis zu einer Kraft von 300 μN und die Residuen des linearen Fits sind kleiner $\pm 1 \mu\text{N}$. Ab einer Antastkraft von 300 μN (4,5 V Ausgangssignal) ändert sich die Steigung der Kalibrierkurve. Ursache ist eine Verschiebung des Antastortes auf dem Cantilever durch die starke Durchbiegung des Cantilevers und Verkippung der Tastspitze.

Bild 12 zeigt das Kalibrierergebnis der Steifigkeitsbestimmung des Cantilever-Kraftsensors. Die durchgeführten fünfzig Messungen weisen eine Standardabweichung von 0,0012 N/m auf, entsprechend 0,01%.

Die Rückführbarkeit der beschriebenen Methode wird durch kalibrierte Massennormale gewährleistet. Die minimale Unsicherheit dieses Verfahrens ist derzeit durch die erreichbare Unsicherheit kleiner Massennormale begrenzt. Diese beträgt bei 1-mg-Massennormalen bspw. 1%. Zur weiteren Verringerung der Messunsicherheit bei kleinen Kräften wird in der PTB eine neuartige Kraft-

messeinrichtung aufgebaut, mit deren Hilfe Kräfte im Nanonewtonbereich rückgeführt werden können [15].

4 Kräfteinstellnormale

Antastkräfte müssen bei Tastschnittgeräten, Rasterkraftmikroskopen, Koordinatenmessgeräten und Härtemessgeräten gemessen werden. Da alle Geräte in der Lage sind, die Auslenkung der Tastspitze zu messen, könnte die Antastkraft einfach durch das Abtasten eines kalibrierten Referenzbiegebalkens bestimmt werden.

In einer Kooperation mit der Arbeitsgruppe Werkstoffe der Mikrotechnik der Technischen Universität Chemnitz und der PTB wurden unterschiedliche

Mikrokraft-Einstellnormale entwickelt. Die PTB kalibriert die Biegesteifigkeit der Normale. Der Anwender führt mit seinem Gerät eine Auslenkungsmessung auf dem jeweiligen Normal durch und kann dann die Antastkraft des Gerätes durch einfache Multiplikation der gemessenen Auslenkung mit der kalibrierten Biegesteifigkeit bestimmen. Ein Spin-off der TU Chemnitz fertigt und vertreibt unterschiedliche Typen dieser Kräfteinstellnormale (s. Bilder 13 und 14). Der einfachste Typ besteht aus einem Silizium-Biegebalken (s. Bild 13) und erlaubt die Kalibrierung von Antastkräften von 1 μN bis 500 mN. Dieser Typ ist auch als zweiseitig eingespannter Biegebalken erhältlich. Die Bestimmung der Auslenkung wird beim zweiseitig eingespannten Normal wesentlich vereinfacht. Ein wesentlicher Unsicherheitsbeitrag dieser Normale ist die Abweichung des Antastortes von der Mittellinie des Normals. Dieses Problem wurde mit der Entwicklung eines 1D-Kräfteinstellnormals für Mikro- und Nanohärtemessgeräte, basierend auf einer Doppelbalkenfeder, gelöst [6] (s. Bild 14).

5 Deformationen beim taktilen Messen von Strukturen

Die taktile Messung von Oberflächen ist bewährt und zuverlässig. Tastschnittmessungen mit genormten Tastspitzen mit 2 μm Spitzenradius und einer Antastkraft von 0,75 mN führen auf den meisten technischen Oberflächen, die eine relativ große Härte und Elastizität aufweisen, zu sehr reproduzierbaren Ergebnissen. Problematisch werden taktile Messungen jedoch, wenn weiche Materialien, Materialien unterschiedlicher Härte und Elastizität gemessen werden sollen. Polymere bspw., die keine große Härte und Elastizität aufweisen, zerkratzen unter herkömmlichen Messbedingungen sehr leicht. Mikrosystemoberflächen, die aus unterschiedlichen Materialien wie Si, SiO₂, Cu, Al, SU-8 oder NiFe aufgebaut sind, deformieren beim taktilen Messen in Abhängigkeit vom E-Modul, der Härte und der Abtastgeschwindigkeit.

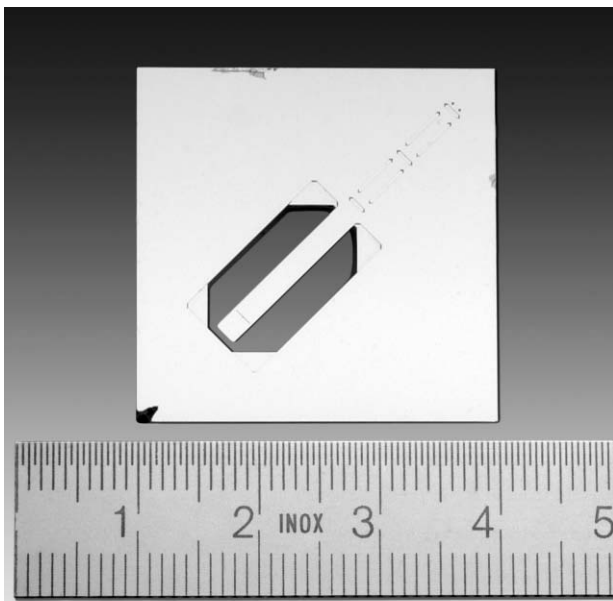


Bild 13 Foto eines kommerziell verfügbaren Mikrokraft-Einstellnormals für Tastschnitt- und Koordinatenmessgeräte.



Bild 14 Foto eines kommerziell verfügbaren 1D-Kraft-Einstellnormals für Mikro- und Nanohärtemessgeräte.

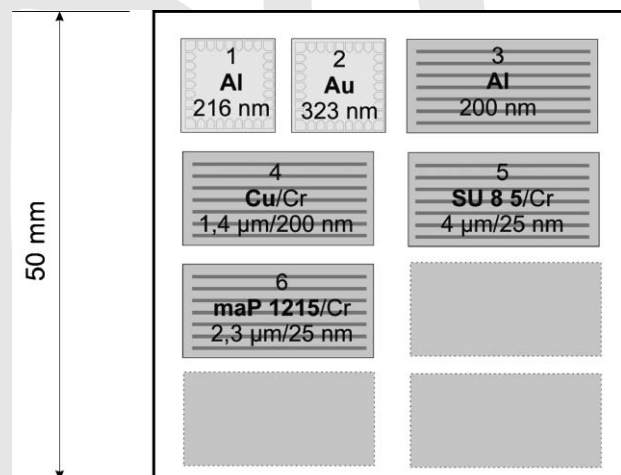


Bild 15 Prinzipbild des verwendeten Schichtdickennormals.

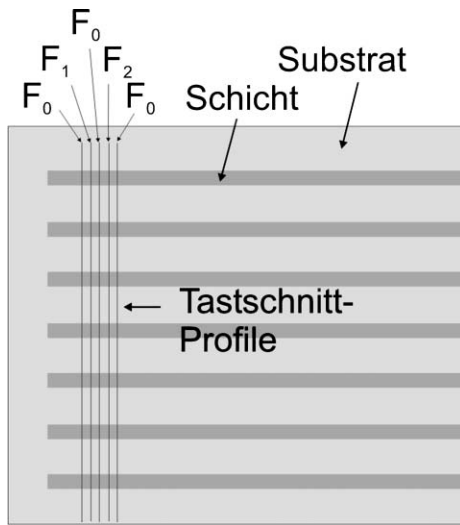


Bild 16 Anordnung der Tastschnittprofile auf dem Schichtdickennormal.

Andererseits bieten optische Messtechniken hierbei nur bedingt Lösungen an. Insofern gilt es, die Bedingungen, unter denen zerstörungsfreie, reproduzierbare Messungen durchgeführt werden können, zu bestimmen. Ziel der im Folgenden vorgestellten Untersuchungen ist die Korrektur von Messungen und die Ermittlung des Einflusses dieser Effekte auf die Messunsicherheit.

Messungen zur Bestimmung der Deformation bei Tastschnittmessungen wurden mit Hilfe dreier Metallschichten (200 nm Aluminium, 300 nm Gold, 1100 nm Kupfer) und zweier Polymerschichten (4100 nm SU-8, 2200 nm maP) durchgeführt (s. Bild 15). Als Substrat diente bei allen Schichten ein 4-Zoll-Silizium-Wafer.

Zur Bestimmung der antastkraftabhängigen Deformation bei Tastschnittmessungen wurden Referenzmessungen mit sehr kleinem Kontaktdruck durchgeführt. Dazu kann entweder die Antastkraft stark reduziert werden, sofern das Tastschnittgerät dies erlaubt, oder es kann ein größerer Tastspitzenradius verwendet werden, um den lokalen Kontaktdruck klein zu halten. Alle Messungen sollten mit derselben Verfahrensgeschwindigkeit durchgeführt werden, da die Verformung des Werkstückes beim Tastschnittverfahren abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit ist. Für sehr kleine Kontaktdrücke (Messkräfte im Bereich weniger Mikronewton bei Verwendung einer Tastspitze mit 2 µm Radius oder Tastspitzenradius im Bereich von 50 µm bei Verwendung einer Antastkraft von 750 µN) ist die Deformation mittelharter Materialien < 2 nm und damit vernachlässigbar, sodass die so gemessene Höhe als Referenzhöhe verwendet werden kann.

Durch Schichtdickenmessung d_m bei unterschiedlichen Antastkräften F_1, F_2, \dots (s. Bild 16) lässt sich nun

Tabelle 1 Gemessene Änderung der Schichtdicke Δd_{meas} , berechnete Deformation des Substrates d_s und resultierende Deformation der Schicht d_W in Abhängigkeit von der Antastkraft F_A des Tastschnittgerätes.

Material	Schichtdicke d nm	F_A µN	d_W nm	d_s nm	Δd_{Fit} nm	Δd_{meas} nm	$d_W(Fit) = a * F_A^b$	
							a	b
Al ($E = 70$ GPa, $\nu = 0,33$) auf SiO ₂ (72 GPa, 0,17)	≈ 216	20	4,3	2,8	–	–	0,68004	0,61673
		250	20,5	15,4	–5,1	–5,1		
		500	31,4	24,4	–7,0	–7,0		
		750	40,3	31,9	–8,4	–		
Au ($E = 79$ GPa, $\nu = 0,42$) auf SiO ₂ (72 GPa, 0,17)	≈ 323	20	3,0	2,8	–	–	0,34929	0,72183
		250	18,8	15,4	–3,4	–3,4		
		500	31,0	24,4	–6,6	–6,6		
		750	41,5	31,9	–9,6	–		
Cu ($E = 110$ GPa, $\nu = 0,35$) auf Si (130 GPa, 0,279)	≈ 1102,9	20	4,3	1,9	–	–	0,68976	0,60879
		250	19,9	10,4	–9,5	–9,7		
		500	30,3	16,4	–13,9	–13,8		
		750	38,8	21,5	–17,3	–		
SU-8 ($E = 4,4$ GPa, $\nu = 0,22$) auf Si (130 GPa, 0,279)	4106,1	5	2,6	0,8	–1,8	–	0,67139	0,85105
		100	33,8	5,6	–28,2	–28,2		
		200	61,0	8,9	–52,1	–52,1		
		500	133	16,4	–116,6	–116,6		
		750	187,8	21,5	–166,3	–		
maP ($E = 110$ GPa, $\nu = 0,35$) auf Si (130 GPa, 0,279)	2187,9	5	1,3	0,8	–0,5	–	0,31723	0,89873
		100	19,9	5,6	–14,3	–14,3		
		200	37,1	8,9	–28,2	–28,2		
		750	121,7	21,5	–100,3	–		

gemessene Schichtdickenänderung: $\Delta d = d_m - d = d_s - d_w$

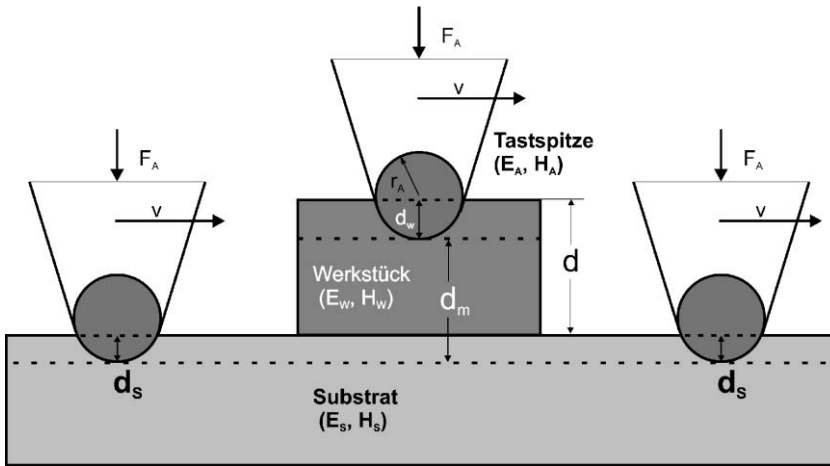


Bild 17 Antastkraftabhängige Deformationen bei der Tastschnittmessung (E_W, E_A : Elastizitätsmodule, ν : Querkontraktionszahl, F_A : Antastkraft, ν : Vorschubgeschwindigkeit, d_m : gemessene Schichtdicke, d : wahre Schichtdicke, d_w : Deformation der Schicht, d_s : Deformation des Substrates).

die Änderung Δd der gemessenen Schichtdicke d_m in Abhängigkeit von der Antastkraft F_A bestimmen und korrigieren:

$$\Delta d(F_A) = d_m(F_A) - d_0 \quad (1)$$

Die Messungen wurden bei einer moderaten Verfahrensgeschwindigkeit von $50 \mu\text{m/s}$ und einer Standardtastspitze mit $2 \mu\text{m}$ Spitzenradius durchgeführt. Die Antastkräfte F_1 und F_2 wurden so gewählt, dass die Deformationen nicht größer als ein Zehntel der Schichtdicke waren, damit ein Einfluss des darunter liegenden Substrates weitgehend ausgeschlossen werden konnte. Die Schichtdicke wurde entsprechend ISO 5436 [16] über eine Stufenhöhenmessung bestimmt. Tabelle 1 enthält die Änderungen der Schichtdicke Δd für die Messungen mit F_1 und F_2 .

Eine numerische Modellierung der gemessenen Deformationen mit dem empirischen Modell von Johnson [17] ist nicht möglich, da dieses nur für statische Härtemessungen von Metallen gilt. Die Deformation des Siliziumsubstrates ist für Kontaktdrücke unterhalb von 70 MPa ($r_A = 2 \mu\text{m}$, $F_A = 0,75 \text{ mN}$) rein elastisch. Sie kann daher rein elastisch nach Hertz [18] berechnet werden:

$$d_s = \left(\frac{9F_A^2}{16r_A \cdot E^{*2}} \right)^{1/3} \quad (2)$$

(s. Tabelle 1) mit r_A dem Tastspitzenradius, F_A der Antastkraft und E^* dem reduzierten Elastizitätsmodul, $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_W^2}{E_W}$ mit ν der Querkontraktion und den Indices A und W für die Antastkugel (A) und das Werkstück (W).

Die Deformation der Werkstoffschicht d_w wurde aus der gemessenen Schichtdickenänderung Δd_{meas} und der berechneten Deformation des Substrates d_s nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta d(F_A) = d_s(F_A) - d_w(F_A) \quad (3)$$

Bei Indentationen treten neben elastischen und plastischen Verformungsanteilen häufig auch viskose Anteile auf [19]. Dies lässt sich in Härtemessungen beobachten, bei denen sich das plastische Fließen manchmal über einige Minuten erstrecken kann und durch Kraft-Haltephasen berücksichtigt wird. Insbesondere bei Polymeren und Gläsern muss von einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnungsrate ausgegangen werden [19]. Diese Abhängigkeit der Verformung von der Dehnungsrate kommt bei Tastschnittmessungen durch die Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit ν zum Ausdruck. Meinhard [19] schlägt daher eine nichtlineare Abhängigkeit der Eindringtiefe d_w von der Antastkraft F_A vor:

$$d_w(\nu, F_A) = a(\nu) \cdot F_A^{b(\nu)} \quad (4)$$

Die in Tabelle 1 aufgeführten Messergebnisse d_w wurden mit Hilfe von Gleichung (4) gefittet. Bild 19 zeigt exemplarisch die Messdaten und die Fitkurve für die

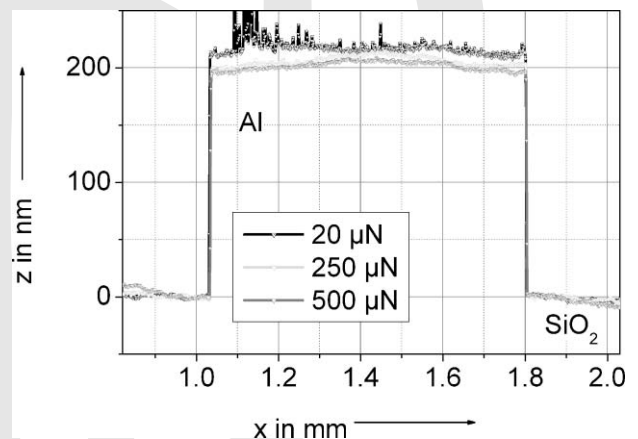


Bild 18 Tastschnittmessung einer Al-Schicht mit drei unterschiedlichen Antastkräften (s. Legende, Spitzenradius $r_A = 2 \mu\text{m}$, Vorschubgeschwindigkeit $\nu = 50 \mu\text{m/s}$).

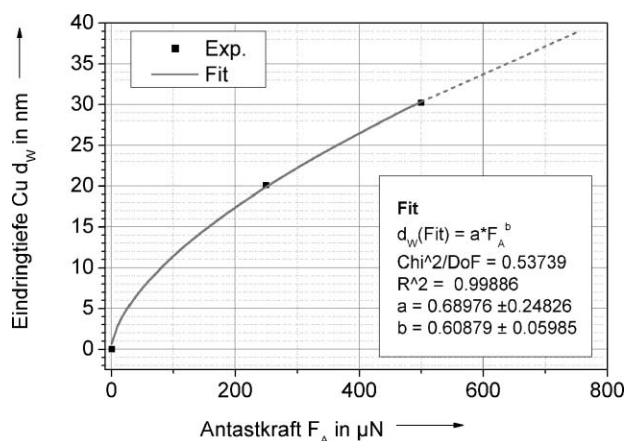


Bild 19 Nichtlineare Kurvenanpassung der Eindringtiefe d_w in Abhängigkeit von der Antastkraft F_A für eine Kupferschicht auf einem Si-Substrat (Tencor P11, $r_A = 2 \mu\text{m}$, $v = 50 \mu\text{m/s}$).

Kupferschicht. Die Fitparameter sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Als Fazit der Untersuchungen lässt sich feststellen, dass die deformationsbedingten Schichtdickenabweichungen bei Tastschnittmessungen unter Normbedingungen Werte zwischen 10 nm und 20 nm für Messungen von Metallschichten auf Silizium und Werte von 100 nm und mehr für Polymere erreichen können. Die existierenden statischen Deformationsmodelle reichen zur Beschreibung dieser Effekte nicht aus und müssen, um auch Effekte der dynamischen Abtastung berücksichtigen zu können, erweitert werden.

Literatur

[1] S. Bütefisch, S. Büttgenbach: Taktile Dreikomponenten-Kraftsensor. In: *tm – Technisches Messen* **66**, 185–190 (1999).

[2] I. Behrens, B. Herold, L. Doering, E. Peiner: Piezoresistive cantilever as portable micro force calibration standard. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* **13**, 171–177 (2003).

[3] W. C. Tang, C. H. Nguyen, R. T. Howe: Laterally driven polysilicon resonant microstructures. In: *Sensors and Actuators A* **20**, S. 25–32 (1989).

[4] J. Frühauf, S. Krönert, U. Brand: Tiefen- und Längennormale aus Silizium. In: *tm – Technisches Messen* **68**(7–8), 326–332 (2001).

[5] J. Frühauf, E. Gärtner, U. Brand, L. Doering: Silicon springs for the calibration of the force of hardness testing instruments and tactile profilometers. Proceedings of 4th euspen International Conference. European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Glasgow, Scotland (2004), S. 362–363.

[6] J. Frühauf, E. Gärtner, K. Herrmann, F. Menelao: Kalibriernormale für Geräte der registrierenden Härteprüfung. In: *tm – Technisches Messen* **74**(7–8), 385–392 (2007).

[7] V. Nesterov, U. Brand: Modelling and investigation of the mechanical and electrical characteristics of the silicon 3D-boss micro probe for force and deflection measurements. In: *J. Micromech. Microeng.* **16**, 1116–1127 (2006).

[8] F25, 3D-Koordinatenmessgerät der Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, 73446 Oberkochen.

[9] V. Nesterov, P. Pornnoppadol, U. Brand, R. Wilke, M. Schmidt, S. Büttgenbach: A Novel Three-Axis Silicon Probe with Integrated Circuit on Chip for Microsystem Components. Proceedings of SPIE Conf. Smart Sensors, Actuators and MEMS, Vol. 5116, Spain (2003), S. 844–849

[10] E. Peiner, L. Doering: Force calibration of stylus instruments using silicon microcantilevers. In: *Sensors and Actuators A* **123–124**, 137–145 (2005).

[11] E. Peiner, M. Balke, L. Doering, U. Brand: Tactile probes for dimensional metrology with microcomponents at nanometre resolution. In: *Meas. Sci. Technol.* **19**, 064001–064008 (2008).

[12] Kraftsensoren FMT-400/120, Kleindiek Nanotechnik GmbH, Aspenhaustraße 25, 72770 Reutlingen, <http://www.nanotechnik.com/fms-em.html> [Zugriff am 8.9.2008].

[13] Kraftsensoren FT-S270/540, Femtotools GmbH, c/o ETH Zürich – IRIS, CLA H19, Tannenstrasse 3, 8092 Zürich, <http://www.femtotools.com/force.htm> [Zugriff am 8.9.2008].

[14] W. Hoffmann, S. Loheide, T. Kleine-Besten, U. Brand, A. Schlachetzki: Methods of characterising micro mechanical beams and its calibration for the application in micro force measurement systems. Proc. MicroTec 2000 in Hannover, S. 819–823.

[15] V. Nesterov: Facility and methods for the measurement of micro and nano forces in the range below 10–5 N with a resolution of 10–12 N (development concept), *Measurement Science and Technology* **18**, 360–366 (2007).

[16] ISO 5436 Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren; Normale – Teil 1: Maßverkörperungen“.

[17] K. L. Johnson: *Contact Mechanics*, Cambridge University Press (1985).

[18] H. Hertz: Über die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für angewandte Mathematik* **92**, 156–171 (1881).

[19] H. Meinhard: Rheologische Untersuchungen zu Härteeindruckexperimenten im Nanometerbereich. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1999.

Manuskripteingang: 20. Januar 2009, zur Veröffentlichung angenommen: 8. März 2009

Dr. Uwe Brand ist Leiter der Arbeitsgruppe Nanokraftmesstechnik für taktile Sensoren im Fachbereich Oberflächenmesstechnik der Abteilung Fertigungsmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Hauptarbeitsgebiete: Mikro- und Nanokraftmesstechnik, Deformationen bei der taktilen Oberflächenmessung

Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, E-Mail: uwe.brand@ptb.de

Dr. rer. nat. habil. Vladimir Nesterov ist Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Nanokraftmesstechnik für taktile Sensoren im Fachbereich Oberflächenmesstechnik der Abteilung Fertigungsmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Hauptarbeitsgebiete: Nanokraftmesstechnik

Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, E-Mail: vladimir.nesterov@ptb.de

Dr. Lutz Doering ist Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Nanokraftmesstechnik für taktile Sensoren im Fachbereich Oberflächenmesstechnik der Abteilung Fertigungsmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Hauptarbeitsgebiete: Piezoresistive Silizium-Rauheitsensoren

Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, E-Mail: lutz.doering@ptb.de

Dr. Sebastian Bütefisch ist Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Nanokraftmesstechnik für taktile Sensoren im Fachbereich Oberflächenmesstechnik der Abteilung Fertigungsmesstechnik der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. Hauptarbeitsgebiete: Piezoresistive 3D-Mikrotaster, Mikrokräftmessung

Adresse: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, E-Mail: sebastian.buetefisch@ptb.de

Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Erwin Peiner leitet die Gruppe Halbleitersensorik und Mikrosystemtechnik am Institut für Halbleitertechnik der TU Braunschweig. Hauptarbeitsgebiete: Mikro-Nano-Integration, piezoresistive/piezoelektrische Cantilever-Sensoren (taktil, Kraft, Masse, Magnetfeld, etc.), piezoresistive Eigenschaften von diamantartigem Kohlenstoff (DLC), nanostrukturiertes Silizium für thermoelektrische Generatoren, Nano-LEDs, Niedertemperatur-Verbindungstechnik.

Adresse: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Institut für Halbleitertechnik, Hans-Sommer-Str. 66, 38106 Braunschweig, E-Mail: e.peiner@tu-bs.de

Prof. Dr. Stephanus Büttgenbach ist Professor für Mikrotechnik an der Technischen Universität Braunschweig und geschäftsführender Leiter des Instituts für Mikrotechnik. Hauptarbeitsgebiete: Prozesstechnolo-

gie, Rechnerunterstützter Entwurf, Entwicklung und Anwendung von Mikrosystemen

Adresse: Institut für Mikrotechnik, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 8, 38106 Braunschweig, E-Mail: s.buettgenbach@tu-bs.de

Prof. Dr. rer. nat. habil. Joachim Frühauf ist Leiter der Fachgruppe Werkstoffe in der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der TU Chemnitz. Hauptarbeitsgebiete: plastisches Umformen von Si-Mikrostrukturen, Ätzen von Si in der Mikrotechnik, Längen- und Kraftmesstechnik bei Mikrostrukturen.

Adresse: Institut für Mikrosystem- und Halbleitertechnik, TU Chemnitz, 09107 Chemnitz, E-Mail: joachim.fruehauf@e-technik.tu-chemnitz.de

Vorschau auf Heft 7–8/2009

Unsere nächste Ausgabe ist ein Schwerpunktheft zum Thema: „International Conference on Precision Measurement (ICPM2008) – Part 2: Precision Measurement and Sensor Technology“ und enthält insbesondere folgende Beiträge:

- *A. Weckenmann, Ph. Krämer*: Application of Computed Tomography in Manufacturing Metrology
- *E. Garbusi, Ch. Pruss, W. Osten*: Process integrated measurement of aspherical surfaces
- *F. Depiereux, W. Hamm, R. Schmitt, G. F. Mallmann*: Fiber Optic Interferometer for Distance Measurements: Investigation of Linearity

Weitere Informationen über geplante Hefte, ausführliche Informationen über die in den letzten Heften der **tm** erschienenen Beiträge sowie Hinweise für Autoren finden Sie im Internet unter <http://www.tm-technisches-messen.de>