

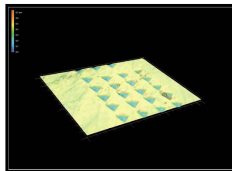
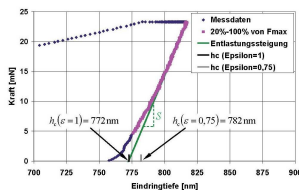
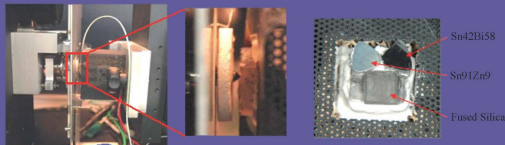


Holger Worrack (Autor)

# Miniaturmessverfahren insbesondere Nanoindentation zur Bestimmung von Materialparametern bei kleinen Werkstoffmengen

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Kontinuumsmechanik und Materialtheorie der Technischen Universität Berlin

Herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang H. Müller



Holger Worrack

## Miniaturmessverfahren insbesondere Nanoindentation zur Bestimmung von Materialparametern bei kleinen Werkstoffmengen



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6206>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>



## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Härtemessverfahren</b> .....	<b>5</b>
2.1 Von der MOHS-Härte zur instrumentierten Eindringprüfung .....	5
2.2 Prüfgeometrien .....	7
2.2.1 Härteprüfung nach BRINELL .....	7
2.2.2 Härteprüfung nach ROCKWELL .....	9
2.2.3 Härteprüfung nach VICKERS .....	10
2.2.4 Härteprüfung nach MARTENS .....	13
2.2.5 Umrechnung zwischen verschiedenen Härtewerten .....	15
<b>3 Mathematische Beziehungen zur Auswertung der instrumentierten Eindringprüfung</b> .....	<b>16</b>
3.1 HERTZsche Kontakttheorie .....	16
3.2 Bestimmung der Entlastungssteigung .....	23
3.3 Bestimmung der Kontakttiefe $h_c$ in Abhängigkeit der Indentergeometrie .....	27
<b>4 Materialtheoretisch begründete Stoffgesetze</b> .....	<b>30</b>
4.1 Elastizitätstheorie .....	30
4.1.1 Lineare Elastizität .....	30
4.1.2 Viskoelastizität .....	34
4.2 Plastizitätstheorie.....	36
4.2.1 Vergleichsspannungshypothese nach VON MISES .....	37
4.2.2 Zeitunabhängige Plastizität .....	39
4.2.3 Isotrope und kinematische Verfestigung .....	41
4.2.4 Zeitabhängige Plastizität (Kriechen) .....	42



---

<b>5</b>	<b>Nanoindentationssystem NanoTest™</b> .....	<b>45</b>
5.1	Kalibrierungsprozedur des Nanoindenters .....	48
5.1.1	Kraftkalibrierung .....	48
5.1.2	Wegkalibrierung .....	51
5.1.3	Bestimmung von Rahmennachgiebigkeit und Diamantengeometrie .....	53
5.2	Problematik der anliegenden Oberflächentemperatur .....	59
5.2.1	Temperaturmessung mittels Thermoelement .....	59
5.2.2	Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera.....	63
5.2.3	Analyse der Temperaturverteilung mittels Finiter Elemente Methode [FEM] .....	66
<b>6</b>	<b>Nanoindentation (Messdurchführung und Ergebnisse)</b> .....	<b>70</b>
6.1	Allgemeine Versuchsdurchführung.....	70
6.2	Übersicht über Versuchsreihen .....	76
6.3	Messergebnisse.....	76
6.3.1	Messungen an Fused Silica .....	76
6.3.2	Messungen an Cu-HCP .....	81
6.3.3	Messungen an SnBi-Lot (Sn42Bi58) .....	85
6.3.4	Messungen an SnZn-Lot (Sn91Zn9) .....	91
6.4	Variation der Haltezeit und Analyse des Kriechverhaltens.....	96
6.4.1	Ergebnisse der Haltezeitvariation an Sn42Bi58-Lot .....	97
6.4.1.1	Messkurven für Sn42Bi58-Lot bei 30°C Solltemperatur .....	97
6.4.1.2	Messkurven für Sn42Bi58-Lot bei 80°C Solltemperatur .....	99
6.4.1.3	Messkurven für Sn42Bi58-Lot bei 130°C Solltemperatur .....	101
6.4.1.4	Ergebnisse für den E-Modul als Funktion von Temperatur und Haltezeit (SnBi). 103	
6.4.1.5	Analyse der Kriechkurven für SnBi-Lot .....	105
6.4.2	Ergebnisse der Haltezeitvariation an Sn91Zn9-Lot .....	107
6.4.2.1	Messkurven für Sn91Zn9-Lot bei 30°C Solltemperatur .....	107
6.4.2.2	Messkurven für Sn91Zn9-Lot bei 80°C Solltemperatur .....	108
6.4.2.3	Ergebnisse für den E-Modul als Funktion von Temperatur und Haltezeit (SnZn) 110	



---

6.5	Kritische Bewertung der Einsetzbarkeit der Nanoindentation zur Bestimmung des temperaturabhängigen E-Moduls bei niedrig schmelzenden Loten .....	111
<b>7</b>	<b>Erweiterte Auswertung der Nanoindentation – Bestimmung zeitunabhängiger plastischer Materialparameter .....</b>	<b>113</b>
7.1	„Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation” [Dao et al., 2001].....	113
7.1.1	Theoretische Untersuchung der Nanoindentation .....	113
7.1.2	Anwendung des indirekten Auswerteschemas - Vorgehensweise .....	116
7.2	Auswertung der Methode nach Dao .....	125
7.2.1	Ergebnisse und Diskussion der erweiterten Auswertung für AA6016T4 .....	128
7.2.2	Ergebnisse der erweiterten Auswertung für Sn42Bi58 .....	135
7.2.3	Diskussion der Auswertemethode nach Dao für die hier verwendeten Werkstoffe 140	
<b>8</b>	<b>Analyse des Kriechverhaltens von Indentationsvorgängen anhand rheologischer Modelle .....</b>	<b>142</b>
8.1	Rheologische Grundmodelle .....	144
8.2	Rheologische Grundmodelle für viskoses Materialverhalten.....	148
8.2.1	MAXWELL-Körper .....	148
8.2.2	KELVIN-Körper .....	149
8.2.3	BINGHAM-Körper.....	150
8.2.4	JEFFREYS-Körper .....	150
8.2.5	LEATHERISCH-Körper.....	152
8.2.6	ZENER <sub>M(AWXWELL)</sub> -Körper .....	154
8.2.7	ZENER <sub>K(ELVIN)</sub> -Körper .....	155
8.2.8	BINGHAM-HOOKE-Körper.....	156
8.3	Anwendung der rheologischen Modelle auf die Nanoindentation .....	158
8.3.1	Ansatz von Menčík.....	158
8.3.2	Durchführung und Ergebnisse der Auswertung nach Menčík .....	163



---

<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>171</b>
<b>Verzeichnis der Formelsymbole.....</b>	<b>174</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>177</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>178</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>184</b>