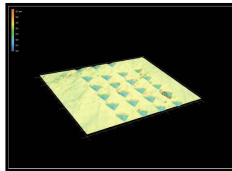
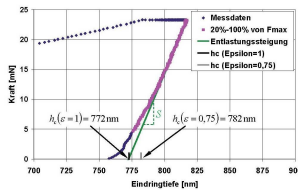
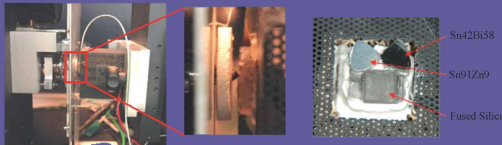




Holger Worrack (Autor)
**Miniaturmessverfahren insbesondere
Nanoindentation zur Bestimmung von
Materialparametern bei kleinen Werkstoffmengen**

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 Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>



Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Abstract	IV
Kurzfassung	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
2 Härtemessverfahren	5
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
3 Mathematische Beziehungen zur Auswertung der instrumentierten Eindringprüfung	16
3.1 HERTZsche Kontakttheorie	16
3.2 Bestimmung der Entlastungssteigung	23
3.3 Bestimmung der Kontakttiefe h_c in Abhängigkeit der Indentergeometrie	27
4 Materialtheoretisch begründete Stoffgesetze	30
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



5	Nanoindentationssystem NanoTest™	45
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
6	Nanoindentation (Messdurchführung und Ergebnisse)	70
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
7	Erweiterte Auswertung der Nanoindentation – Bestimmung zeitunabhängiger plastischer Materialparameter	113
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	
8	Analyse des Kriechverhaltens von Indentationsvorgängen anhand rheologischer Modelle	142
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 _{M(AWXWELL)} -Körper	154
8.2.7	ZENER _{K(ELVIN)} -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



Zusammenfassung.....	171
Verzeichnis der Formelsymbole.....	174
Tabellenverzeichnis.....	177
Abbildungsverzeichnis.....	178
Literaturverzeichnis.....	184