



## InnoNetProjekt 16IN0121

# „Innovative Technologien für die Herstellung und den Einsatz von Präzisionszerspanwerkzeugen in der Mikrotechnik“

In Kooperation mit

FETTE GmbH Präzisionswerkzeuge & Maschinen, Schwarzenbek

FRANKEN GmbH & Co. KG, Rückersdorf

GESAU – WERKZEUGE Fabrikations- und Service GmbH, Glauchau-Gesau

BALZERS Verschleißschutz GmbH, Bingen

TECHNO-COAT Oberflächentechnik GmbH, Zittau

ANGARIS GmbH, Halle

KDS Radeberger Präzisions-Formen- und Werkzeugbau GmbH, Großröhrsdorf

WETZEL GmbH, Grenzach-Wyhlen

Berlin Heart AG, Berlin

Schlussbericht

### **Autoren:**

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Dipl.-Ing. Kai Schauer

TU Berlin, Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb

Dr. M. Fütting, Dr. M. Petzold, Dipl.-Ing. J. Lucas, Dipl.-Phys. F. Muster

Fraunhofer Institut Werkstoffmechanik/Halle

Februar 2007

Inhalt	Seite
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik zu Beginn des Projektes.....	3
3 Projektziele.....	7
4 Kooperationspartner.....	8
5 Arbeitsplan.....	11
6 Entwicklungsschritte und Ergebnisse.....	13
6.1    Prozessverhalten herkömmlicher Mikroschafffräser in der Bearbeitung.....	13
6.1.1    Phänomenologische Bewertung der Bearbeitungsergebnisse und Werkzeuge ....	13
6.1.2    Dynamisches Werkzeugverhalten.....	23
6.1.3    Prozesskräfte.....	32
6.2    Beanspruchungen herkömmlicher Mikroschafffräser.....	39
6.2.1    Beanspruchungsanalyse anhand eines vereinfachten Werkzeugmodells.....	39
6.2.2    Beanspruchungsanalyse komplexer Werkzeuge.....	43
6.3    Eine konstruktive Lösung für prozesssichere Mikroschafffräser.....	48
6.3.1    Lösungsansatz.....	48
6.3.2    Konstruktive Realisierung.....	50
6.4    Leistungspotenziale des Mikrofräsens durch die neuartigen Mikroschafffräser.....	56
6.4.1    Implementierung der Werkzeugoptimierung im Werkzeugherstellungsprozess ....	56
6.4.2    Außenlängsrunddrehen zur Ermittlung technologischer Bearbeitungsparameter ..	58
6.4.3    Mikrofräsen mit optimierten Mikroschafffräsern.....	62
7 Werkstoffmechanische Untersuchungen.....	83
7.1    Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse werkstoffmechanischer Untersuchungen.....	83
7.2    Mechanische Kennwertermittlung am Hartmetall.....	86
7.2.1    Drei-Punkt-Biegeversuche.....	86
7.2.2    Zwei-Punkt-Biegeversuche.....	89
7.2.3    Messung der Bruchzähigkeit $K_{IC}$ .....	92
7.2.4    Weibullanalyse der Drei-Punkt-Biegeversuche.....	96
7.2.5    Härten aus instrumentierter und statischer Eindruckprüfung.....	100

---

7.2.6	Elastizitätsmodul aus Drei-Punkt-Biegeversuch.....	108
7.2.7	Elastizitätsmodul aus instrumentiertem Eindringversuch .....	108
7.2.8	Elastizitätsmodul aus Ultraschallmessung .....	111
7.3	Gefügecharakterisierung der eingesetzten Hartmetalle .....	112
7.4	Werkstoffmechanische Charakterisierung der Hartstoffschichten .....	117
7.4.1	Härten aus instrumentierter Eindruckprüfung .....	118
7.4.2	Elastizitätsmoduli aus instrumentierter Eindruckprüfung .....	128
7.4.3	Gleitverschleißuntersuchungen .....	132
7.4.4	Haffestigkeitsuntersuchungen bzw. Scratch-Tests .....	142
7.4.5	Schichteigenspannungen .....	145
7.4.6	Schichtdickenmessungen .....	148
7.5	FE-Simulationen zur Biegebruchfestigkeit .....	154
7.6	FE-Simulationen zum Spanvorgang .....	157
8	Werkzeugoptimierung durch Nachbearbeitungsverfahren.....	166
8.1	Nachbearbeitung durch Ionenstrahlen.....	166
8.2	Nachbearbeitung durch elektrochemisches Polieren .....	168
8.3	Zusammenfassung und Bewertung der Nachbearbeitungsverfahren.....	170
8.4	Konzept und Vorversuche zur Ionenstrahlnachbearbeitung - Precision Polishing with Ion Beam (PPIB) .....	172
8.5	Prototypentwicklung — Konstruktion, Bau und Testung .....	175
8.5.1	Anlagenbeschreibung.....	176
9	Nutzen und Verwertung der Ergebnisse .....	197
10	Veröffentlichungen aus dem Projekt .....	201
11	Literatur .....	202

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

### Formelzeichen

$\alpha_0$	°	Freiwinkel
$\beta$	-	Beanspruchungsfaktor (Spannung/Festigkeit)
$\beta_0$	°	Keilwinkel
$\gamma$	Hz	Konstante (Divisor) im Modell der Dehnratenabhängigkeit
$\gamma_0$	°	Spanwinkel
$\delta$	µm	Abdrängung des Fräsers (radial)
$\varepsilon$	-	Verzerrung (Dehnung)
$\dot{\varepsilon}$	Hz	Dehnrates
$\dot{\varepsilon}_{pl}$	Hz	plastische Dehnrates
$\phi$	°	circumferentiale Koordinate
$\kappa_M$	-	Spitzenkorrekturfaktor der Martenshärtes
$\kappa_{IT}$	-	Spitzenkorrekturfaktor der Eindringhärtes
$\kappa_{Scr}$	-	Korrekturfaktor der Haftfestigkeites
$\lambda$	°	Drallwinkel
$\mu$	-	Gleitreibungskoeffizient
$\nu$	-	Querkontraktionszahl, Poissonzahl
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	MPa	Spannung
$\sigma_0$	MPa	Normalisierungsspannung (scale parameter) der Weibullverteilung
$\sigma_B$	MPa	Biegespannung beim Bruch (Biegefestigkeites)
$\sigma_C$	MPa	kritische Spannung allg. (Bruch)
$\sigma_{F0}$	MPa	dehnratenunabhängige Fließspannung
$\sigma_F$	MPa	dehnratenabhängige Fließspannung
$\sigma_i$	MPa	(Schicht-)Eigenspannung (initial or residual stress)
$\sigma_H$	MPa	Haftfestigkeites (Scratchtest)
$\sigma_V$	MPa	Von-Mises-Vergleichsspannung
$\omega$	rad/min	Kreisfrequenz
$A_S$	µm <sup>2</sup>	Spannungsquerschnitt
$D$	µm	Fräserdurchmesser
$E$	GPa	E-Modul (Steifigkeites)
$F_a$	N	Aktivkraft (Schnittkraft)
$F_C$	N	Kritische Kraft (z. B. beim Scratchversuch)
$F_B$	N	Bruchkraft bei Biegeversuchen
$F_{max}$	N	Kraft bei maximaler Eindringtiefe (Härtemessung)
$F_x=F_f$	N	Vorschubkraft (x-Richtung) u. a.
$F_y=F_{fN}$	N	Vorschubnormalenkraft (y-Richtung)
$F_V$	N	Vorkraft (Biegeversuche)
$F_z$	N	Axialkraft

$G$	GPa	Schubmodul, Gleitmodul
$H_{IT}$	GPa	Eindringhärte, plastische (Universal-)Härte, geschätzte Vickershärte
$HM$	GPa	Martenshärte (=Universalhärte HU)
$HRC$	-	Rockwell-Härte
$HV$	kp/mm <sup>2</sup>	Vickers-Härte (HV-Wert)
$HV'$	GPa	Vickers-Härte (in SI-Einheiten)
$K_{IC}$	MNm <sup>-3/2</sup>	Bruchzähigkeit, kritischer Spannungsintensitätsfaktor (Mode I)
$L$	mm	Fräserlänge gesamt
$L_{fräs}$	m	Fräsweg
$L_A$	mm	Auflagerabstand (Biegeversuche)
$R$	µm	Fräserradius
$R_a$	µm	arithmetischer Mittenrauwert
$R_K$	µm	Radius der kugelförmigen Indenterspitze
$R_{kr0}$	mm	Krümmungsradius der Ronden vor Beschichtung
$R_{kr0}$	mm	Krümmungsradius der Ronden nach Beschichtung
$R_T$	MPa	Zugfestigkeit
$R_z$	µm	gemittelte Rautiefe
$T$	°C	Temperatur
$Y$	-	Geometriefunktion beim Spröbruch
$a$	µm	Schneidenlänge (axial) oder Defektgröße (Risslänge)
$a_e$	µm	Eingriffstiefe/breite (radial)
$a_m$	µm	mittlere Eckrisslänge (Vickers-Härte)
$a_p$	µm	Schnitttiefe (axial)
$d$	µm	Kerndurchmesser
$d_m$	µm	mittlere Diagonalenlänge (Vickers-Härte)
$d_R$	µm	Rondendicke (Substratdicke)
$d_{schaft}$	µm	Schaftdurchmesser
$d_s$	µm	Schichtdicke
$f_{e1}$	Hz	1. Eigenfrequenz
$f_n, n$	Hz, 1/min	Drehfrequenz, Drehzahl
$f_{nxz}$	Hz	Zähnevielfaches der Drehfrequenz
$f$	µm	Vorschub pro Umdrehung
$f_z$	µm	Zahnvorschub
$h_{flex}$	µm	Durchbiegung bei Biegeversuchen
$h_{max}$	µm	maximale Eindringtiefe bei instrumenteller Eindruckprüfung
$h_{pl}$	µm	plastische Eindringtiefe bei instrumenteller Eindruckprüfung
$l$	µm	effektive Fräserlänge (kritische Länge)
$l_1$	µm	Schneidenlänge
$l_2$	µm	Konuslänge
$l_3$	µm	Schaftlänge
$l_k$	µm	freie Kraglänge
$m$	1	Weibull-Modul (Exponent)