

**Leistungsoptimierung von TiAlN-Verschleißschutzschichten für das  
Außenlängsdrehen mit Hartmetallwendeschneidplatten**

**Dissertation**

zur Erlangung des Akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Dmitri Sladkov  
geb. am 25.03.1974 in Moskau, Rußland

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. i.R. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. Friedhelm Lierath

Prof. Dr.-Ing. habil. Anatoli S. Vereschaka

Promotionskolloquium am 02.11.2004



## **DANKSAGUNG**

Mein herzlicher Dank geht an alle, die an der Fertigstellung der vorliegenden Arbeit einen großen Anteil haben.

Ich bedanke mich recht herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. mult. F. Lierath sowie bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. A. S. Vereschaka für die wissenschaftliche Anregung zu dieser Dissertation sowie deren Betreuung und für die Begutachtung der Arbeit.

Desgleichen möchte ich mich an dieser Stelle bei Frau Dr.-Ing. L. Dübner und Herrn Dr.-Ing. H.-J. Pieper für die Unterstützung unserer Arbeitsgruppe bedanken.

Mein besonderer Dank geht an Herrn Dr. rer. nat. A. Panckow sowie an Herrn Dipl.-Ing. J. Steffenhagen für die praktisch-wissenschaftliche und organisatorische Betreuung bzw. Unterstützung.

Allen Mitarbeiter des Lehrstuhls für Abtrenntechnik und des Versuchsfelds möchte ich für ihre Diskussionsbereitschaft und praktische Unterstützung meinen Dank aussprechen.

Ich danke meinen Eltern.



---

## VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLE

AC	Alternate Current
Al	Aluminium
$a_p$	Schnitttiefe
Arc-PVD	Vakuumlichtbogenverdampfung
BIAS	Vorspannung
C45	Stahl C45
CNC	Computer Numerical Control
Cr	Chrom
CTT	Chemical-Thermal Treatment
CVD	Chemical Vapour Deposition
D	Durchmesser
DC	Direct Current
DEK	diffraktionselastische Konstante
DLC	diamantähnliches amorphes Kohlenstoff
$d_s$	Schichtdicke
EDS	standardfreie Mikrosonden-Röntgenanalyse
$E_r$	reduzierter Modul
F	Kraft
f	Vorschub
$F_c$	Schnittkraft
$F_f$	Vorschubkraft
$F_p$	Passivkraft
HB	Brinell-Härte
HF	Haftfestigkeitsklasse
$H_{ind}$	Indentorhärte
HM	Hartmetall
$h_{sp}$	Spandicke
HSS	High-Speed Steel
HV	Vickers-Härte

I	Strom
IBAD	Ion-Beam-Assisted-Deposition
II	Ionenimplantation
IN	Ionennitrieren
IP	Ion Plating (Ionenplattieren)
k	Anzahl der Steuerungsfaktoren
KIB	kombinierte Ionenstrahl- und -beschichtungstechnologie
LA-CVD	Laser-Assisted Chemical Vapour Deposition
LA-PVD	Laser-Assisted Physical Vapour Deposition
L <sub>c</sub>	kritische Last
LH	Laser Hardening
l <sub>kpl</sub>	Länge des plastischen Kontaktes
MEVVA	Metal Vapour Vacuum Arc
n	Drehzahl
p	Druck
PA-CTT	Plasma Assisted Chemical-Thermal Treatment
PA-CVD	Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition
PCVD	plasmagestützte CVD-Verfahren
PVD	Physical Vapour Deposition
R	zufälliger funktioneller Prozessparameter
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
s	Schichtdicke
T	Standzeit
t	Schnittzeit
Ti	Titan
U	Spannung
U <sub>IBAD</sub>	Beschleunigungsspannung während der Schichtabscheidung
U <sub>IMP</sub>	Beschleunigungsspannung bei Implantationsbehandlung
VB	Verschleißmarkenbreite
VB <sub>1</sub>	mittlerer Schneidenschleiß
VB <sub>E</sub>	Eckenverschleiß
VB <sub>max</sub>	maximaler Verschleiß
v <sub>c</sub>	Schnittgeschwindigkeit

---

WC	Wolfram-Karbid
XRD	X-Ray Diffraction
XSA	X-ray stress analysis
Z	Steuerungsfaktor
zul.	zulässige Größe
$\alpha$	Freiwinkel
$\phi$	Scherwinkel
$\gamma$	Spanwinkel
$\kappa_r$	Werkzeug-Einstellwinkel
$\lambda$	Wellenlänge
$\sigma_{  }$	Mikroeigenstress II. Art





---

## VERZEICHNIS DER BILDER

Bild 1:	Verfahren für Oberflächenmodifikationen und deren Entwicklungstendenzen .....	6
Bild 2:	Plasmaerzeugung durch Vakuum-Lichtbogenverdampfung.....	10
Bild 3:	Schematischer Aufbau eines Beschichtungskomplexes (nach dem Prinzip der Funktionsschicht-Kombination) [3] .....	16
Bild 4:	Kammer der Beschichtungsanlage NNV 6.6 mit Verdampfern und Gestell.....	19
Bild 5:	Stellplan der Beschichtungsanlage NNV6.6-I5 mit einzelnen Komponenten.....	20
Bild 6:	Schematischer Aufbau der Beschichtungsanlage NNV6.6-I5 .....	21
Bild 7:	Vakuumlichtbogenverdampfer konventioneller Bauart a) und Separatortyp b) .....	22
Bild 8:	Arbeitskennlinien des Separators .....	24
Bild 9:	Visuelle Darstellung der für die Untersuchungen eingesetzten Wendeschnidplatten.....	27
Bild 10:	Aufstellung der zu beschichtenden Wendeschnidplatten in der Vakuumkammer der Beschichtungsanlage.....	27
Bild 11:	Schematischer Ablauf des Behandlungsprozesses .....	28
Bild 12:	Schematischer Aufbau der mehrlagigen Verschleißschutzkomplexe.....	30
Bild 13:	Schematische Darstellung der Kalottenschliffmethode .....	34
Bild 14:	Kalotte auf einer TiAlN-Schicht .....	34
Bild 15:	Fischerscope MMS mit dem Betascope-Modul und dem Messtisch (Quelle: Helmut Fischer GmbH + Co) .....	35
Bild 16:	Schema des Beta-Rückstreuverfahrens (Quelle: Helmut Fischer GmbH + Co) .....	35
Bild 17:	Abhängigkeit der Schichtdicke vom Strom der Titan-Kathode .....	36
Bild 18:	Abhängigkeit der Schichtdicke von der BIAS-Spannung.....	36
Bild 19:	Schematische Darstellung der Kleinlasthärteprüfung a) und Eindruck des Indentors b) (Quelle: Zwick GmbH & Co) .....	37

Bild 20: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte von dem Strom der Titan-Kathode.....	38
Bild 21: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte von dem Druck in der Kammer	39
Bild 22: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte von der BIAS-Spannung .....	39
Bild 23: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte bzw. Mikrohärtigkeit vom Schichtaufbau.....	40
Bild 24: Schematische Darstellung der Haftfestigkeitsklassen nach VDI-Richtlinie 3198.....	40
Bild 25: Ritztest zur Bestimmung der Haftfestigkeit der Schicht: Prinzip (links); Gerät (rechts) .....	41
Bild 26: Typische Scratchtest-Spuren: a) Schicht hält; b) Schicht reißt bzw. platzt ab.....	42
Bild 27: Abhängigkeit der Schichthaftung vom Strom der Titan-Kathode.....	43
Bild 28: Abhängigkeit der Schichthaftung von der BIAS-Spannung .....	43
Bild 29: Abhängigkeit der Schichthaftung vom Druck in der Vakuumkammer.....	44
Bild 30: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte vom Titan-Gehalt in der TiAlN-Schicht.....	45
Bild 31: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Mikrosonden-Röntgenanalyse für die Probe Nr. 113 .....	46
Bild 32: Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie vom Druck in der Vakuumkammer .....	48
Bild 33: Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie vom Strom der Titan-Kathode.....	49
Bild 34: Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie von der BIAS-Spannung.....	50
Bild 35: Die Oberflächenmorphologie von ausgewählten Proben (143, 113 und 173) .....	51
Bild 36: Verschleißmessgrößen an der Freifläche des Schneidkeils.....	53
Bild 37: Zerspankraft und ihre Komponenten beim Drehen.....	53
Bild 38: 3-Komponenten-Kraftmessplattform mit Werkzeughalter (Quelle: Kistler Instrumente AG).....	53
Bild 39: 3-Komponenten-Kraftmessplattform für das Drehen mit Abmessungen (Quelle: Kistler Instrumente AG).....	54

Bild 40: Hommel-Tester T1000 mit dem Druckermodul (Quelle: Hommelwerke GmbH) .....	55
Bild 41: Definition des arithmetischen Mittenrauhwertes $R_a$ und der maximalen Rauheitsprofilhöhe $R_z$ nach DIN EN ISO 4287 (Quelle: Hommelwerke GmbH) .....	56
Bild 42: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens vom Strom der Titan-Kathode .....	60
Bild 43: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens vom Druck in der Vakuumkammer .....	60
Bild 44: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens von der BIAS-Spannung .....	61
Bild 45: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens vom Schichtaufbau .....	61
Bild 46: Abhängigkeit der Standzeit vom Strom der Titan-Kathode für das Ti/TiN/TiAlN-System.....	63
Bild 47: Abhängigkeit der Standzeit vom Druck in der Vakuumkammer für das Ti/TiN/TiAlN-System.....	64
Bild 48: Abhängigkeit der Standzeit von der BIAS-Spannung für das Ti/TiN/TiAlN-System.....	65
Bild 49: Abhängigkeit der Schnittkraft vom Strom der Titan-Kathode .....	67
Bild 50: Abhängigkeit der Schnittkraft vom Druck in der Vakuumkammer .....	67
Bild 51: Abhängigkeit der Schnittkraft von der BIAS-Spannung.....	68
Bild 52: Änderung der Scherzone bzw. der Kontaktlänge des Spanes mit der Spanfläche des Werkzeuges infolge des Spanens mit beschichtetem Werkzeug (gestrichelte Linien und Bezeichnungen mit Strichen beziehen sich auf das beschichtete Werkzeug).....	69
Bild 53: Zeitlicher Verlauf des Mittenrauhwertes der hergestellten Werkstückoberfläche für ausgewählte Proben .....	71
Bild 54: Standzeitdiagramme für ausgewählte Versuchsproben .....	73
Bild 55: Versuchsplan für die Ermittlung der Modellparameter beim Drehen .....	78
Bild 56: Graphische Veranschaulichung des Modells (Punkte: experimentell ermittelte Standzeiten; Fläche: mit dem Modell berechneter Standzeitverlauf) .....	80

---

Bild 57: Hochenergie-Ionenquelle (Implantor) .....	84
Bild 58: „Nanotest“ - Messgerät zur Erfassung mechanischer Eigenschaften von Beschichtungen und Oberflächenrandzonen; schematische Darstellung des Messaufbaus (Quelle: Micro Materials Ltd. Wrexham, UK) .....	85
Bild 59: Härte der mit IBAD-behandelten Wendeschneidplatten .....	87
Bild 60: E-Modul der mit IBAD-behandelten Wendeschneidplatten .....	88
Bild 61: DEK von TiN, berechnet nach den Modellen von Voigt, Reuss und Kröner .....	89
Bild 62: Diffraktogramme der einzelnen Schichten, aufgenommen unter verschiedenen $\psi$ - Neigungswinkeln .....	91
Bild 63: $d_{\psi}(220)$ - $\sin^2\psi$ -Verteilungen für die verschiedenen Schichten.....	92
Bild 64: Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten (für VB) von mit hochenergetischen Metallionen behandelten Hartmetallwendeschneidplatten .....	94
Bild 65: Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten (für $VB_E$ ) von mit hochenergetischen Metallionen behandelten Hartmetallwendeschneidplatten .....	95

---

## VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tabelle 1: Technologie zur Reinigung von metallischen Substraten vor der PVD-Beschichtung.....	17
Tabelle 2: Optimale Impulsparameter für das Ionensputtern und die Schichtabscheidung.....	18
Tabelle 3: Parameter der Plasmavor- und Plasmaendbehandlungsprozesse ....	28
Tabelle 4: Zu variierende Abscheidungsparameter der TiAlN-Deckschicht.....	29
Tabelle 5: Atomare Verhältnisse der Metalle in verschiedenen TiAlN-Schichten, abgeschieden auf Hartmetall-Wendeschnidplatten.....	47
Tabelle 6: Prozessparameter der Ionenimplantation .....	82
Tabelle 7: Beschichtungsparameter und Eigenschaften der Versuchsreihe TN01-04;.....	87
Tabelle 8: Zusammenstellung der Ergebnisse der Eigenspannungsanalyse .....	93
Tabelle 9: Beschreibung der untersuchten Wendeschneidplatten.....	94
Tabelle 10: Scratchtest-Ergebnisse für IBAD-behandelte Proben.....	97



## INHALTSVERZEICHNIS

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole.....	I
Verzeichnis der Bilder .....	V
Verzeichnis der Tabellen .....	IX
Inhaltsverzeichnis .....	XI
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik .....	5
2.1 Vakuumbeschichtungsverfahren .....	5
2.2 Vakuumlichtbogen-Ionenplattieren (Arc-PVD).....	8
2.3 Beschichtungsarchitektur .....	12
2.4 Stand der TiAlN-Beschichtungen .....	13
3 Kombinierte Plasmabehandlungs- und -beschichtungstechnologie.....	15
3.1 Allgemeiner Aufbau eines Beschichtungskomplexes .....	15
3.2 Verfahrensbeschreibung .....	16
3.2.1 Substratreinigung .....	16
3.2.2 Plasmatechnologie.....	17
3.2.2.1 Gepulste Plasmabehandlung .....	17
3.2.2.2 Gefiltertes Vakuumlichtbogen-Ionenplattieren .....	18
3.2.3 Beschichtungsanlage.....	19
3.2.3.1 Aufbaustruktur der Beschichtungsanlage .....	20
3.2.3.2 Funktionsprinzip der Beschichtungsanlage .....	25
3.2.3.3 Technische Daten der Beschichtungsanlage .....	26
4 Herstellung und physikalische Charakterisierung beschichteter Proben .....	27
4.1 Probenherstellung .....	27
4.1.1 Parameter des Beschichtungsprozesses.....	28
4.1.1.1 Schichtaufbau.....	29
4.2 Charakterisierung von Hartstoffschichten .....	30
4.2.1 Anforderungen an Verschleißschutzschichten .....	30
4.2.2 Beurteilung der Schichtqualität .....	32
4.2.3 Schichtparameter.....	33
4.3 Makroskopische Eigenschaften der Hartstoffschichten.....	33

4.3.1	Schichtdicke .....	33
4.3.2	Schichthärte .....	37
4.3.3	Schichthaftung .....	40
4.4	Mikroskopische Eigenschaften der Beschichtungen .....	44
4.4.1	Elektronenmikroskopische Strukturanalyse.....	44
4.4.2	Oberflächenmorphologie .....	47
4.5	Technologische Parameter (Analysetechnik und -methoden) .....	52
4.5.1	Werkzeugverschleiß und Standzeit.....	52
4.5.2	Zerspankraft .....	53
4.5.3	Oberflächenrauheit des erzeugten Werkstücks.....	54
5	Untersuchung der Leistungsfähigkeit beschichteter Zerspanwerkzeuge beim Drehen .....	57
5.1	Gerätetechnische und technologische Vorbereitung der Zerspantests ....	57
5.2	Drehen mit beschichteten Hartmetallwendeschneidplatten .....	58
5.2.1	Versuchsplanung und -durchführung .....	58
5.2.2	Versuchsergebnisse und Auswertung .....	59
5.2.2.1	Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten.....	59
5.2.2.2	Standzeit-Verhalten .....	62
5.2.2.3	Kraft-Verhalten.....	66
5.2.2.4	Rauheits-Verhalten .....	70
5.3	Empirisches Modell .....	73
5.3.1	Optimierungskriterien des Zerspanungs- bzw. Beschichtungsprozesses.....	73
5.3.2	Auswahl des mathematischen Modells .....	74
5.3.3	Modell für das Drehen mit beschichteten Hartmetallwerkzeugen.....	76
6	Oberflächenbehandlung von Werkzeugen durch Implantation bzw. IBAD unter Einsatz hochenergetischer Metallionen .....	81
6.1	Stand der Technik .....	81
6.1.1	Ionenimplantation (II).....	82
6.1.2	Ionenassistierte Beschichtung (IBAD) .....	83
6.1.3	Die Hochenergie-Ionenquelle .....	83
6.1.3.1	Technische Daten des Implantors .....	84
6.2	Herstellung und physikalische Charakterisierung behandelte Proben.....	85



---

6.2.1	Probenherstellung .....	86
6.2.2	Physikalische Labortests .....	86
6.2.3	Stressanalyse .....	88
6.2.3.1	Messbedingungen, Auswerteparameter .....	88
6.2.3.2	Auswertung .....	89
6.3	Untersuchung der Leistungsfähigkeit behandelter Zespanwerkzeuge beim Drehen.....	93
6.3.1	Versuchsergebnisse und Auswertung.....	93
6.4	Diskussion der Ergebnisse.....	95
7	Wirtschaftlichkeits- und Kostenabschätzung .....	99
8	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	101
	Literaturverzeichnis.....	105
	Anlage	



## 1 EINLEITUNG

Die Schneidstoffentwicklung für Zerspanwerkzeuge machte in den letzten Jahren große Fortschritte. So finden heute in großem Umfang beschichtete HSS- und Hartmetallwerkzeuge Verwendung in den einzelnen Bereichen der Fertigung. Die weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen zielt weiterhin auf eine zu erreichende Produktivitätssteigerung durch Anwendung höherer Schnittwerte ab. Ein weiterer Aspekt ist die Zuverlässigkeit von Zerspanwerkzeugen gerade bei der Endbearbeitung von Bauteilen, die mit jedem Arbeitsfortschritt einen hohen Wertzuwachs zu verzeichnen haben. Als dritte Variante bietet sich die Möglichkeit zur Trockenbearbeitung und somit zur Einsparung von Aufwand und Kosten für Kühlschmierstoffe an [1].

Die praxiswirksame Einführung des Beschichtens von Werkzeugen vor allem aus Schnellarbeitsstahl und Hartmetall, aber auch aus Schneidkeramik und Cermet hat zu einer deutlichen Leistungssteigerung in der Zerspantechnik geführt. Die Zerspanwerkzeuge erhalten durch das Beschichten mit Hartstoffen einen wesentlich verbesserten Verschleißschutz und ermöglichen wegen ihres längeren Standvermögens eine Steigerung der Produktivität und Zuverlässigkeit im Fertigungsprozess.

Die Beschichtung dieser Werkzeuge erfolgt mittels chemischer (CVD) oder physikalischer Abscheidung (PVD) mit einer deutlichen Tendenz zur Anwendung der plasmagestützten „physikalischen“ Verfahren. Zu den am weitesten verbreiteten PVD-Verfahren zur Hartstoffbeschichtung von Werkzeugen zählt die Vakuumlichtbogenverdampfung (Arc-PVD).

Das Arc-PVD-Verfahren wurde seit den ersten patentrechtlichen Aktivitäten von T.A. Edison auf diesem Gebiet (1892) [2] wesentlich weiterentwickelt und den Erfordernissen der jeweiligen Beschichtungsanwendung angepasst. Gegenwärtig wird das Arc-PVD-Verfahren als Ionenplattier-technologie mit verstärktem Ionenbeschuss des Substrates (Rußland: KIB-, USA: Multiarc-Verfahren) eingesetzt. Bei dieser kombinierten Ionenstrahl- und -beschichtungstechnologie

werden die Vorteile einer chemothermischen Plasmabehandlung der Substratoberflächen und eines Vakuumbogen-Ionenplattierprozesses miteinander vereint. Da hier der Bereich der Substrattemperatur zwischen 300 - 1000°C liegt und durch geeignete Zusatzmodule und entsprechende Teiltechnologien weiter gesenkt werden kann, ist diese Technologie universell und besonders für Werkstoffe mit geringer Wärmebeständigkeit geeignet.

An konventionell beschichteten Werkzeugen werden oftmals negative Effekte beobachtet, wie eine niedrige Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat und ein geringer Widerstand gegen plastische Verformung der Werkzeugunterlage als Folge der Veränderung der Geometrie und dynamischen Belastung der Schneidkante. Dies führt zu einer verminderten Leistungsfähigkeit, die insbesondere bei der Bearbeitung unter erschwerten Zerspanbedingungen, z.B. bei Wechselbelastungen und beim Zerspanen von schwerzerspanbaren Werkstoffen, in Erscheinung tritt.

Andere bekannte Methoden zur Verbesserung des Verschleißverhaltens der Werkzeuge, wie z.B. die thermochemische Oberflächenbehandlung in einem Glimmentladungsplasma oder die Schwermetallionen-Implantation sind als einzelne, selbständige Verfahren weniger effektiv als die Hartstoffbeschichtung. Es besteht also trotz aller nachgewiesenen Erfolge ein großer Handlungsbedarf zur weiteren Erhöhung der Leistung und Zuverlässigkeit beschichteter Werkzeuge durch Entwicklung und technologische Umsetzung effektiverer Oberflächenbehandlungsmethoden.

Durch Kombination von thermochemischer Plasmabehandlung und ionengestützter Vakuumbogenabscheidung in der kombinierten Ionenstrahl- und Beschichtungstechnologie wurde ein wesentlicher Schritt bei der Lösung der erwähnten Probleme vollzogen.

So kann auch der Einsatz eines beschichteten Werkzeuges durch Anwendung der Trockenbearbeitung zur Einsparung der Kosten für den Kühlschmierstoff, aber auch zur Senkung der Werkzeugkosten beitragen. Bei Einsatz eines beschichteten Werkzeuges lassen sich die Kosten für die erforderliche Menge

unbeschichteter Werkzeuge einsparen, die zum Erreichen der gleichen Standzeit nötig wäre.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden umfangreiche Untersuchungen an beschichteten Zerspanwerkzeugen vorgenommen. Zahlreiche Versuche zum Standzeitverhalten unterschiedlicher Beschichtungen werden im Hauptteil der Arbeit vorgestellt und ausgewertet.



## 2 STAND DER TECHNIK

In der metallverarbeitenden Industrie werden seit Anfang der siebziger Jahre beschichtete Werkzeuge in größerem Umfang eingesetzt. Insbesondere die Beschichtung von Zerspanwerkzeugen aus Hartmetall und Schnellarbeitsstahl mit verschleißfesten Hartstoffschichten führte zu einer Produktivitätserhöhung um bis zu 20 bis 40%, einer Erhöhung der Standzeit auf das 1,5- bis 3fache sowie zur entscheidenden Verbesserung der Qualität der bearbeiteten Bauteile [3, 4]. Verfahren für Oberflächenmodifikationen und deren Entwicklungstendenzen sind in *Bild 1* dargestellt.

### 2.1 Vakuumbeschichtungsverfahren

Bei den **CVD-Verfahren** liegen alle am Schichtaufbau beteiligten Komponenten als relativ reaktionsträge Moleküle chemischer Verbindungen im gasförmigen Aggregatzustand vor. Durch zumeist thermische Aktivierung der Substrate wird eine chemische Gasphasenreaktion eingeleitet, die zur Abscheidung einer Schicht auf der Substratoberfläche sowie zur Bildung von anderen, leicht flüchtigen Reaktionsprodukten führt. Dies geschieht bei Gasdrücken von ca.  $10^2$  Pa bis zu atmosphärischen Drücken von  $10^5$  Pa. Die Vorteile der CVD-Schichten sind z. B. eine sehr gute Haftung (durch ausgeprägte Diffusionsvorgänge in der Verbindungszone Schicht-Substrat) sowie eine hohe Homogenität der Schichtdicke über den gesamten Oberflächenbereich des Substrates. [5, 6]

Nachteilig bei diesem Verfahren sind insbesondere die erforderlichen hohen Temperaturen von ca.  $1000^\circ\text{C}$ , die nur eine begrenzte Auswahl von Substratmaterialien für die Beschichtung zulassen, der erforderliche Umgang mit giftigen, aggressiven, explosionsgefährlichen Ausgangsstoffen sowie die notwendige Entsorgung der entstehenden Reaktionsprodukte. [7, 8, 9]

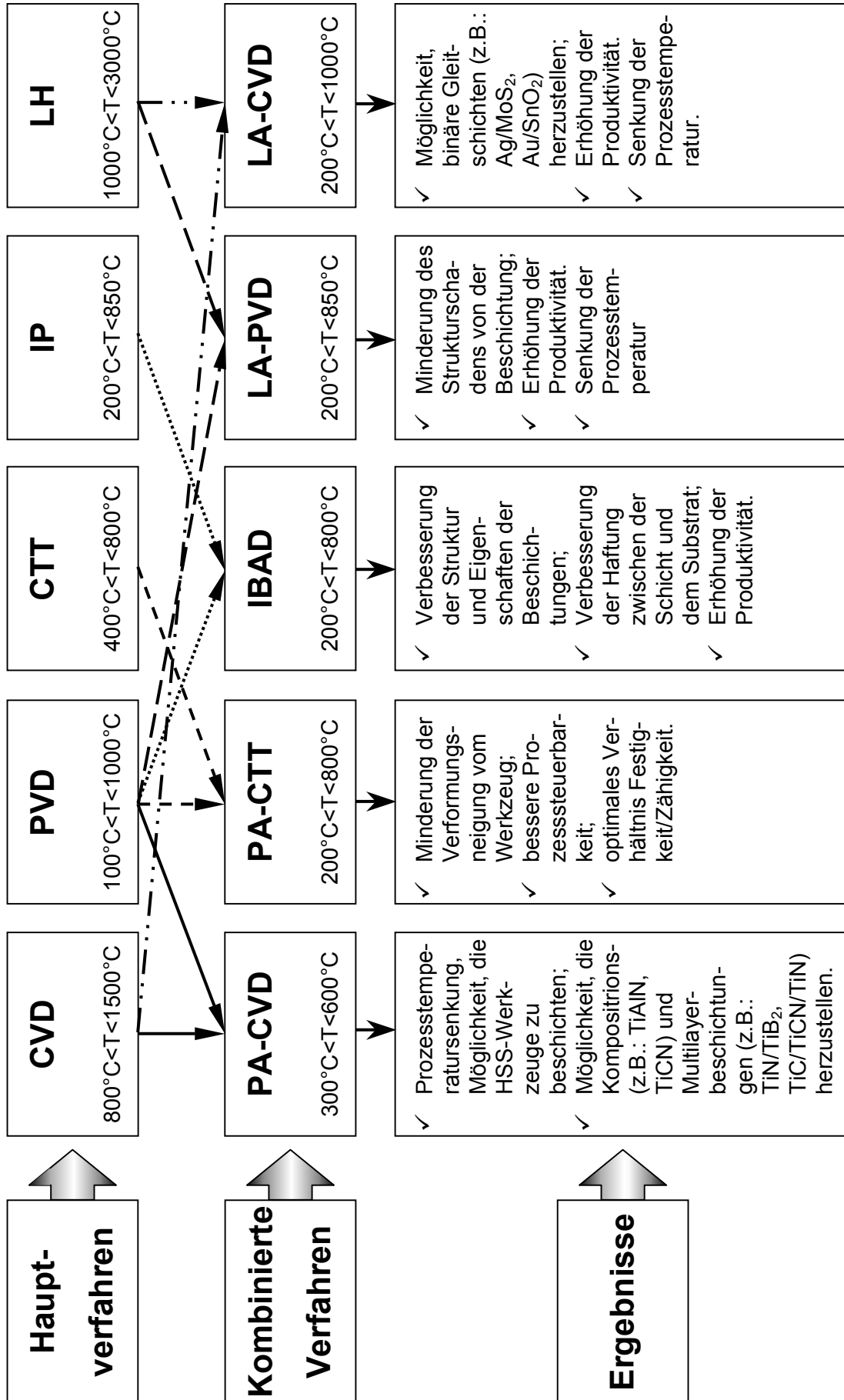


Bild 1: Verfahren für Oberflächenmodifikationen und deren Entwicklungstendenzen



Beim **plasmagestützten CVD-Verfahren** (PCVD) wird dem Reaktionsgas in einer Niederdruckglimmentladung ein Nichtgleichgewichtsplasma überlagert, in dem die Elektronentemperatur wesentlich höher als die Temperatur der Ionen und Neutralteilchen ist. In einem solchen nichtisothermen Plasma sind die Temperatur des Neutralgases und seine Anregung zwei relativ unabhängig variierbare Parameter, so dass die innere Energie viel höher ist als die des Gases im thermodynamischen Gleichgewicht bei gleicher Temperatur. Dadurch werden chemische Reaktionen möglich, die im thermodynamischen Gleichgewicht sonst nur bei wesentlich höheren Temperaturen ablaufen können.

Das Verfahren arbeitet in dem Druckbereich von 50 bis 500 Pa und bei Temperaturen von 400 bis 600 °C. [10]

Bei den **PVD-Verfahren** werden die maßgeblich am Schichtaufbau beteiligten Komponenten (meist Metalle) während des Beschichtungsprozesses verdampft oder zerstäubt. Aus dem so entstandenen Dampf bzw. Plasma kondensieren Moleküle bzw. Ionen teilweise unter Reaktion mit weiteren gasförmigen Komponenten (Reaktivgasen) als Schicht auf der Substratoberfläche. Dies geschieht bei Drücken von  $10^{-3}$  Pa bis zu 10 Pa, wodurch für die Anwendung von PVD-Verfahren Vakuumanlagen erforderlich sind. Die Vorteile dieser Verfahren liegen zum einen in der geringeren möglichen Substrattemperatur während der Beschichtung von 500°C bis zu 200°C und zum anderen in der großen Vielfalt der erzeugbaren Schichttypen, da die einzelnen Komponenten meist elementar vorliegen.

Als Beschichtungsverfahren zur Herstellung von Hartstoffschichten setzen sich gerade bei Zerspanwerkzeugen, bei denen scharfe Kanten gefordert werden, zunehmend PVD-Verfahren durch [11]. Ein weiterer Vorteil dieser Verfahrensgruppe gegenüber CVD-Verfahren, die geringe Abscheidungstemperatur, spielt bei der schonenden Beschichtung thermisch sensibler Substratmaterialien, ja sogar selbst bei der Beschichtung von Hartmetallwerkzeugen, eine ständig wachsende Rolle [12].

## 2.2 Vakuumlichtbogen-Ionenplattieren (Arc-PVD)

Als eine der wichtigsten PVD-Technologien zur Beschichtung von metallischen Werkzeugen hat sich das Vakuumlichtbogen-Ionenplattieren (Arc-PVD) durchgesetzt. Hier erfolgt die Verdampfung des festen Kathodenmaterials im selbsterhaltendem Vakuumlichtbogen, d.h. im Metaldampfplasma der Kathode [13, 14, 15, 16, 17]. Gegenüber anderen PVD-Verfahren ist der sehr hohe Ionisationsgrad von 95-98% vorteilhaft, d.h. fast das gesamte Plasma besteht aus den Ionen des Kathodenmaterials. Diese Ionen werden auf die zu beschichtenden Oberflächen beschleunigt. Das Ionenbombardement wird genutzt, um die Oberflächen vor der Schichtabscheidung zu reinigen, aufzuheizen und zu aktivieren (Ionensputtern, -ätzen) sowie während der Beschichtung die Schichteigenschaften infolge Material- und Energieeintrags (Ionenplattieren) zu beeinflussen. Aus mehreren, simultan arbeitenden Arc-Verdampfern mit unterschiedlichem Kathodenmaterial können auf diese Weise sehr einfach Mehrkomponentenschichten, sogenannte Kompositbeschichtungen, abgeschieden werden. Nebenkomponenten können als Reaktivgas zugeführt werden. Durch die zeitlich aufeinanderfolgende Abscheidung von unterschiedlichen Materialien können mehrlagige Beschichtungen (Multilayer) und funktionell gegliederte Schichtarchitekturen erzeugt werden.

Aufgrund der geringen Substrattemperatur während der PVD-Abscheidung fehlt hier eine, für die CVD-Beschichtung typische Interdiffusionsschicht an der Grenzfläche zwischen Schicht und Substrat. Zur Beseitigung dieses Problems, das sich negativ auf die Schichtadhäsion auswirken kann, haben sich folgende Behandlungsmethoden sowie deren Kombination als günstig erwiesen:

- Implantation (tief) bzw. Subplantation (flach) von Ionen des Beschichtungsmaterials in die Substratoberfläche vor dem eigentlichen Beschichtungsprozess,
- thermisch aktivierte Interdiffusion an der Grenzfläche Substrat/Schicht,
- Abscheidung einer Adhäsionsschichtlage zwischen Substrat und Schicht,
- Ionenmischen der Grenzflächen durch Beschuss mit Ionen mittlerer und hoher Energie (1-200keV) nach der Schichtabscheidung.

Zu den Vakuumlichtbogen-Ionenplattier-Verfahren gehören die in Rußland entwickelte KIB-Methode (Kondensation aus der Plasmaphase unter Ionenbombardement) sowie die auf der Basis des KIB-Patentes entwickelten ARC-PVD- und ION-BOND-Methoden der Firma Multi Arc Vacuum Systems, USA [3, 18].

Beim KIB-Verfahren erfolgen die Teilprozesse:

- Substrataufheizung durch Elektronen- und Ionenbeschuss,
- thermochemische Plasmanitrierung des Substrates,
- Ionenabtragen (Zerstäuben),
- ionengestützte Abscheidung der einzelnen Funktionsschichtlagen des Beschichtungssystems,

in einer Vakuumkammer ohne Unterbrechung des Vakuums [3]. Beim Verfahren der Vakuumbogenverdampfung beträgt die mittlere Energie der das Substrat bombardierenden Metallionen 1 bis 6 keV [3, 19], beim 50kV-Implantor bis zu 200 keV. Folglich wird den Atomen auf der Substratoberfläche ständig eine hohe Energie zugeführt und so die chemische Reaktion mit den Reaktivgaskomponenten aktiviert. Außerdem wird durch den Ionenbeschuss die Schicht- und Grenzflächenstruktur maßgeblich beeinflusst. Die Oberflächenatome erhalten unter dem Ionenbombardement ausreichend Energie, um ein Wachstum kompakter Schichten zu gewährleisten. An den Grenzflächen wird durch den Ionenbeschuss eine Durchmischung der aneinander grenzenden Schichtlagen bewirkt. Die durch den Beschuss verursachte Defekt- und lokale Temperaturerhöhung an der Substratoberfläche bewirkt eine starke Beschleunigung der Diffusionsprozesse. Dieser Effekt wird sowohl beim KIB- als auch ION-BOND-Verfahren zur Erzeugung einer Diffusionsschicht an der Substratoberfläche und zur Erhöhung der Haftung zwischen Schicht und Substrat bzw. zwischen den Schichtlagen untereinander ausgenutzt.

Intensive Bestrebungen wurden unternommen, um durch gerätetechnische Neuentwicklungen und verfahrenstechnische Modifizierungen das Verfahren der Vakuumlichtbogenabscheidung weiter zu verbessern. Zur besseren Ausnutzung der Kathoden und für homogenere Entladungen bei speziellen Kathodengeometrien wurden magnetische Steuereinrichtungen entwickelt, mit

deren Hilfe von der Anwendung zufälliger Bogenentladungen (random arcs) zur Nutzung kontrollierter Vakuumbogenentladungen übergegangen werden kann (steered arcs) [20].

Ein großes Problem ist die Entstehung von Makropartikeln bei der Vakuumbogenverdampfung, insbesondere beim Verdampfen von Materialien mit niedrigem Schmelzpunkt z.B. Al, TiAl-Legierungen (*Bild 2*). Der Einbau dieser sogenannten Droplets, deren Durchmesser bis über 100  $\mu\text{m}$  betragen kann, verursacht in den Hartstoffschichten strukturelle Fehler, die insbesondere beim Übergang zu immer dünneren Schichtlagen in Mehrschichtsystemen sehr negative Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Beschichtung haben. In die Beschichtung eingebaute große Droplets verursachen die Entstehung von mechanischen Verspannungen, Schichtablösungen, Mikroporen und Mikrorissen. Obwohl es auch Berichte über eine positive Wirkung kleiner Droplets zur Spannungsverminderung in der Hartstoffschicht gibt [21], geht der internationale Trend in der Beschichtungstechnologie in Richtung der Minderung bzw. Verhinderung der Dropletmission [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

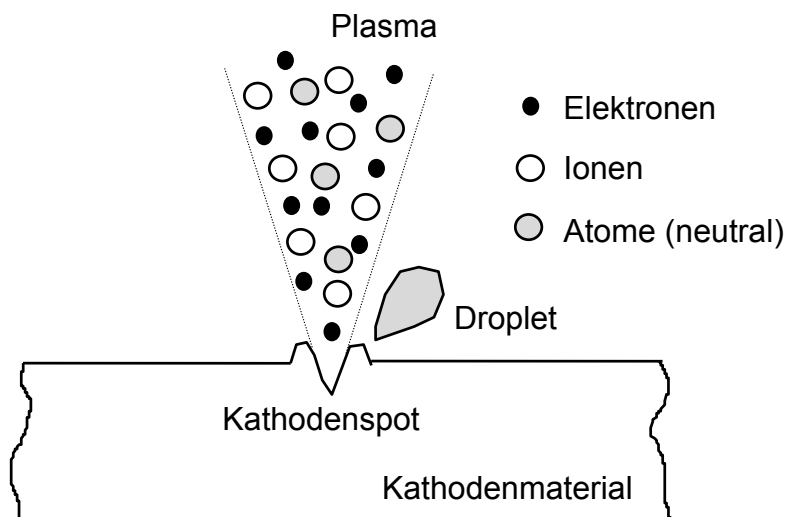


Bild 2: Plasmaerzeugung durch Vakuumbogenverdampfung

Als die effektivste Methode zur Verminderung der Dropletmission wird der Einsatz elektromagnetischer Felder in entsprechend modifizierten Plasmaquellen angesehen. Erstmals wurde von Aksenov ein erfolgreicher Einsatz von

Magnetspulen zur Fokussierung und Separation des Plasmastroms beschrieben. Der Einsatz dieser magnetischen Fokussierungs- und Stabilisierungsfelder in Vakuumbogenquellen, die durch koaxial um das Target angeordnete Spulen erzeugt werden, ist aktueller Stand der Technik [3, 22]. Durch Modifizierung eines koaxialen Magnetfeldes mittels geeigneter Polschuhgeometrie zu einem sogenannten Flaschenhalsfeld wurde von Coll (Multi-Arc Scientific Coatings, USA) eine wesentliche Verringerung der Dropletmission erreicht [27].

Eine zweite Möglichkeit zur Minderung der Emission von Makropartikeln besteht im Einsatz von torroidalen Magnetfeldern, die mittels Ringspulen erzeugt werden. Hierbei werden die Ionen im Magnetfeld so abgelenkt, dass sie das Substrat erreichen, während die nicht beeinflussbaren neutralen und Makropartikel an der Innenwand des röhrenförmigen Spulenkörpers abgeschieden werden. Auf der Grundlage dieses Prinzips wurden mehrere modifizierte Plasmaquellen entwickelt und zur Ausfilterung von neutralen und Makropartikeln aus dem Plasmastrom bei der Abscheidung von Metallen, Legierungen und amorphen Diamantschichten eingesetzt. Durch Verwendung dieser Methode konnte die Dropletmission auf bis zu 10% verringert werden [34, 35].

Die Entwicklung von gepulsten Spannungsquellen (Hochspannungspulsgeneratoren) für den Einsatz in Plasmabeschichtungsanlagen wurde aus dem Zwang heraus vorangetrieben, erstens die Entstehung von parasitären Bogenentladungen bei Glimmentladungen zu unterdrücken und zweitens bei möglichst geringen Substrattemperaturen hohe Energien des Ionenbombardements zu realisieren. Das Prinzip besteht darin, statt einer kontinuierlichen eine pulsierende Gleichspannung an die Substrate anzulegen. In Abhängigkeit von der gewählten Pulsdauer und Spannungsamplitude wird die Ausbildung ungewollter Mikrobögen verhindert. Ein weiterer Vorteil, der sich aus der Anwendung gepulsten Plasmas ergibt, ist die Möglichkeit der voneinander unabhängigen Regelung von Ionenenergie und Substrattemperatur. Eine gepulste Spannungsversorgung nach diesem Prinzip wird bei der Puls-Plasma-CVD [36] und der Plasma-Immersion-Implantation mit ECR-Mikrowellenanregung des Plasmas [37] genutzt. Demgegenüber ist der Einsatz gepulster Stromversorger für

Vakuumlichtbogen-Verdampfer zu unterscheiden, durch den die Dropletgröße und -anzahl reduziert werden kann [38, 39].

Detaillierte Untersuchungen zur Hartstoffbeschichtung bei niedrigen Substrattemperaturen unter Anwendung gepulster Substratvorspannungen (Bias) wurden am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart, von Kampschulte und Mitarbeitern durchgeführt. Hierbei konnte durch Überlagerung hoher gepulster Biasspannungen mit niedrigen DC-Grundspannungen eine Senkung der Substrattemperatur von bis zu 50 K ohne Qualitätseinbußen in den Schichtleistungsparametern erreicht werden [40, 41].

Entsprechend der Vielfalt von Beschichtungsverfahren ist international eine Reihe von Anlagen zur plasmagestützten Erzeugung von Hartstoffschichten bekannt. Neben dem Vorhandensein gemeinsamer Merkmale unterscheiden sich diese Anlagen nach dem jeweils verwendeten Verfahrensprinzip, nach der Anzahl und dem Typ der entsprechenden Plasmaquellen, nach der Größe und der Ausdehnung der Arbeitskammer sowie nach dem Prinzip der Substratbeschickung [3, 18, 42]. Als sehr vorteilhaft hat sich die Kombination mehrerer verschiedener Verdampfungsmethoden in einer Anlage herausgestellt, da in diesem Falle Nachteile der einzelnen Verfahren kompensiert und Vorteile besser ausgenutzt werden können.

### **2.3 Beschichtungsarchitektur**

In den letzten Jahren wurden die Eigenschaften der Substrate und der Beschichtungswerkstoffe intensiv untersucht [3, 13, 43, 44, 45, 46]. Es wurde festgestellt, daß einlagige Hartstoffbeschichtungen, sogenannte Monoschichten, den aktuellen Anforderungen der spanenden Bearbeitung neuer Werkstoffe, z. B. korrosionsfester, wärmebeständiger Legierungen auf NiCr- oder TiAl-Basis, nicht mehr genügen. Die Entwicklung geht daher weltweit zu mehrlagigen Beschichtungen, d.h. weniglagigen Beschichtungsarchitekturen bis hin zu Vielschichtsystemen (Multilayer).

Zahlreiche Untersuchungen zeigen eine bedeutende Produktivitätserhöhung beim Einsatz von Werkzeugen mit mehrlagigen Beschichtungen und Gradienten-

beschichtungen [3, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54]. Hervorzuheben sei hier insbesondere das in [3] formulierte *Prinzip der mehrlagigen Beschichtungsarchitektur* bestehend aus Funktionsschichtlagen, das eine wesentliche Grundlage für die in der vorliegenden Arbeit angewendeten Methodik des Architekturdesigns bildet. Weiterhin zeichnet sich eine eindeutige Tendenz zum Übergang von Einkomponentenschichten zu Mehrkomponentenschichten, sogenannten Kompositbeschichtungen, ab (ternäre Systeme: (Ti,Al)N [55], (Ti,Zr)N [56, 57], (Ti,Nb)N [58], (Ti,Hf)N, (Ti,Mo)N [3] und quaternäre Systeme (Ti,Al,V)N, (Ti,Zr,C)N [55, 56, 59]). Weitere Entwicklungen gehen in Richtung des Einsatzes reibungsvermindernder Schichten, z.B. auf der Basis von MoS<sub>2</sub>[60], CrN [61] und tribologisch aktiver Schichten auf der Basis des diamantähnlichen amorphen Kohlenstoffs (DLC, a-WC:H) [62], zur Verminderung bzw. Einsparung von Kühl- und Schmierstoffen bei zerspanenden und tribologischen Prozessen.

Obwohl eine große Anzahl neuer Beschichtungen und Schichtsysteme entwickelt wurde, von denen nur wenige genannt wurden, hat sich die Zahl der in der industriellen Praxis eingesetzten Beschichtungstypen neben den bisher etablierten TiN-, (Ti,Al)N- und Ti(C,N)-Beschichtungen nicht wesentlich erhöht. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass das theoretische Verständnis für die Vorgänge im tribologischen Kontakt und im Zerspanprozess bisher nicht ausreicht, um eine Beschichtung entsprechend dem konkreten Beanspruchungsprofil herzustellen bzw. auszuwählen [63]. Andererseits gibt es in der theoretischen Durchdringung der plasmaphysikalischen Prozesse der verschiedenen Verfahren zur Hartstoffbeschichtung noch erhebliche Lücken, so dass eine reproduzierbare Steuerung der Eigenschaften des Gesamtsystems von Beschichtung und Substrat durch eine gezielte Wahl aller relevanten Verfahrensparameter des Beschichtungsprozesses immer noch sehr kompliziert ist.

## 2.4 Stand der TiAlN-Beschichtungen

Die PVD-Schichten auf TiAlN-Basis haben den Markt der beschichteten Hochleistungswerkzeuge in den letzten Jahren eindeutig erobert. Der Marktanteil der TiAlN-Beschichtungen liegt im Bereich der Hochleistungswerkzeuge zwischen

25-55%. Die Gründe dafür müssen in den hervorragenden Eigenschaften der TiAlN-basierten Schichten gesucht werden [55, 64]:

- hohe Härte (25..38 GPa) bei relativ niedriger interner Spannung (-3..-5 GPa),
- hohe Warmhärte (niedrige Härteverluste (30..40%) bei höheren Temperaturen bis zu 800 °C),
- hohe Oxidationsbeständigkeit (gleiche Oxidationsrate (ca. 12..20 µg/cm<sup>2</sup>) bei 800 °C wie TiCN bei 400 °C und TiN bei 550 °C),
- niedrige Wärmeleitfähigkeit (bis zu 30% niedrigere relative Wärme-eindringung als bei TiN).

Um diese guten Eigenschaften noch weiter zu verbessern, sollen die Prozessparameter (ARC-Strom, Bias-Spannung, N<sub>2</sub>-Druckverlauf, Schichtarchitektur) optimiert werden. Eine der wichtigsten Maßnahmen zur Optimierung der TiAlN-basierten Schichten ist die Erhöhung des Aluminium-Gehaltes. Damit werden die Härte (vor allem die Warmhärte), die Verschleißfestigkeit, die Oxidationsbeständigkeit und letzten Endes natürlich das Zerspanbarkeitsverhalten verbessert. Aber irgendwann gibt es (bei zu hohem Aluminium-Anteil) eine Grenze. Danach verschlechtern sich die Eigenschaften der Schichten.

Die optimalen Schichteigenschaften sind für die verschiedenen Werkstückwerkstoffe bzw. Zerspanverfahren unterschiedlich. Diese Eigenschaften zu optimieren, ist das Ziel dieser Arbeit.



### **3 KOMBINIERTE PLASMABEHANDLUNGS- UND -BESCHICHTUNGSTECHNOLOGIE**

Die zur Herstellung neuer Verschleißschutzkomplexe eingesetzte *Kombinierte Plasmabehandlungs- und -beschichtungstechnologie* ist ein Oberflächenveredelungsverfahren, bei dem die ionengestützte Plasmaoberflächenbehandlung und die Ionenplattier-Beschichtung in abwechselnd aufeinanderfolgenden Prozessschritten angewendet werden. Dabei ist von großem Vorteil, dass der Vakuumprozess kontinuierlich abläuft, d.h. keine Zwischenbelüftung erfolgt, und so saubere, adsorbat- und oxidarme Oberflächen in den Plasmaprozessen zur Verfügung stehen. In der Offenlegungsschrift wurden die wesentlichen Prozesseigenschaften dargelegt [65]. In den folgenden Abschnitten werden die charakteristischen Plasmamethoden, gepulste Plasmabehandlung und gefiltertes Vakuumlichtbogen-Ionenplattieren, beschrieben, deren integrierte Anwendung die Eigenschaften der erzeugten Beschichtungskomplexe wesentlich beeinflusst.

#### **3.1 Allgemeiner Aufbau eines Beschichtungskomplexes**

Das Verfahren der Vakuum-Lichtbogenverdampfung (Arc-PVD-Verfahren) bildet die Grundlage der kombinierten Plasmabehandlungs- und -beschichtungstechnologie, wobei jedoch eine Ergänzung und Erweiterung durch andere ionen- und plasmaunterstützte Verfahren erfolgt. So können Teilverfahren wie Ionenätzen, Ionenplattieren, Plasmabehandeln (z.B. Plasmanitrieren) mit dem eigentlichen Prozeß der Hartstoffbeschichtung kombiniert werden, indem mehrere Verfahren in einer bestimmten zeitlichen Abfolge oder zum Teil sogar zeitlich parallel ablaufen. Somit wird nicht nur eine Hartstoffschicht auf der Werkzeugoberfläche abgeschieden, sondern ein mehrlagiger Beschichtungskomplex im Verbund mit dem Substratmaterial geschaffen, der den gestellten Anforderungen durch die Kombination der gezielt gestalteten Eigenschaften der einzelnen Funktionsschichten in bester Weise gerecht wird [3]. Hierbei werden der hohe Ionisationsgrad des Plasmas und die hohe Energie der zum Substrat beschleunigten Ionen gezielt zur Beeinflussung der Substrat- und Schichtstruktur

eingesetzt. Der schematische Aufbau eines Beschichtungskomplexes ist in *Bild 3* dargestellt.

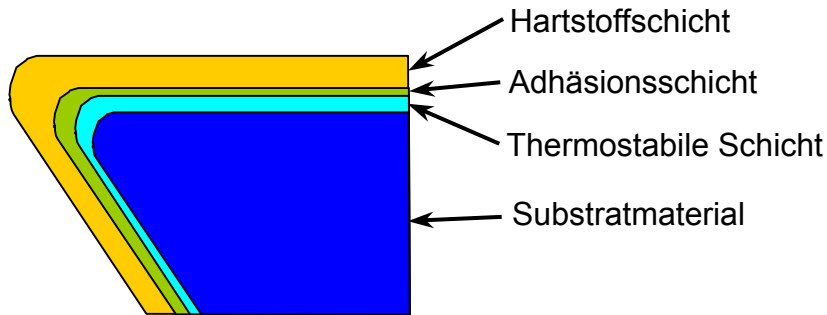


Bild 3: Schematischer Aufbau eines Beschichtungskomplexes (nach dem Prinzip der Funktionsschicht-Kombination) [3]

## 3.2 Verfahrensbeschreibung

### 3.2.1 Substratreinigung

Zur Vorbereitung der Substrate, d.h. der unbeschichteten Werkzeuge aus Hartmetall und Schnellarbeitsstahl, auf den Beschichtungsprozess sind grobe Verunreinigungen wie Lämprückstände, Konservierungsfette und Oxidationsschichten zu entfernen. Zu diesem Zweck wird die in *Tabelle 1* angegebene Kombination von einem nasschemischen Ultraschallverfahren, einem maschinellen Klarspülen und einer rückstandsfreien Trocknung eingesetzt. Zur Reinigungsstrecke zählen folgende Geräte:

- Industriereinigungsautomat PROFESSIONAL IR 6000, Fa. Miele,
- Wasserdemineralisierer AQUA PURIFICATOR G 7795/1, Fa. Miele,
- 2 Ultraschallreinigungsgeräte RK 1028 CH, Fa. Bandelin/Sonorex.

Tabelle 1: Technologie zur Reinigung von metallischen Substraten vor der PVD-Beschichtung

Nr.	Reinigungsabschnitt	Details
1	Nasschemische Ultraschallreinigung nach NGL Cleaning Technology SA	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. alkalischer Reiniger GALVEX SU 93 (50g/l), Ultraschallbad, 70 °C, 2-3 min</li> <li>2. Zwischenspülung mit Stadt- und demineralisiertem Wasser im Industriereinigungsautomat IR6000, Miele</li> <li>3. saurer Reiniger RODASTEL 30 SUP (5%), Ultraschallbad, 50 °C, 2-3 min</li> <li>4. Zwischenspülung mit Stadtwasser im Industriereinigungsautomat IR6000, Miele</li> <li>5. Endreinigungs- und Korrosionsschutz-Tauchbad GALVEX 17.30 SNR (1%), 60 °C, 2-3 min</li> <li>6. Endspülung mit Stadt- und demineralisiertem Wasser im Industriereinigungsautomat IR6000, Miele</li> </ol>
2	Trocknung	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Abblasen mit getrockneter Rein-Druckluft</li> <li>2. Warmlufttrocknung , 100°C, im IR6000</li> </ol>

### 3.2.2 Plasmatechnologie

#### 3.2.2.1 Gepulste Plasmabehandlung

Durch Anlegen einer gepulsten Spannung an die zu beschichtenden Teile (Substrate) werden die Ionen nicht wie üblich kontinuierlich, sondern nur kurzzeitig auf die Substratoberflächen beschleunigt. Dies ist insbesondere bei hohen Beschleunigungsspannungen oberhalb von 600 V, also im Ionensputterregime, das zur Reinigung und Aufheizung der Oberflächen eingesetzt wird, geeignet, um einen hohen Einzelenergieeintrag der Ionen ohne eine zu starke

Substraterwärmung zu gewährleisten. Dabei erweist es sich als sehr günstig, in den „Abkühlpausen“ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Spannungsimpulsen nicht völlig spannungslos zu arbeiten, sondern eine Grundspannung von mindestens 100 V anzulegen. Insbesondere bei Anwendung des Pulsmodus während der Schichtabscheidung ist dies und ein Impuls-Pause-Verhältnis  $>2$  sogar zwingend notwendig, um die Haftfestigkeit einer Beschichtung zu gewährleisten. Generell erwies sich die höchstmögliche Rechteck-Pulsfrequenz von 30 kHz als am besten geeignet, um unerwünschte Mikro-Bogenentladungen auf den Substratoberflächen durch schnelles Auslöschen zu unterdrücken. In *Tabelle 2* werden für verschiedene Plasmaprozesse optimierte Impulsparameter angegeben. Hier ist zu berücksichtigen, dass beim Ionensputtern die effektive Spannung mit zunehmendem Reinheitsgrad der Oberfläche mit einer Zeitrampe erhöht wird. Dies wird realisiert durch eine stufenlose Erhöhung des Impuls-Pause-Verhältnisses bzw. der Grundspannung beim Argon-Ionensputtern oder durch einen stufenlosen Übergang vom Pulsmodus zum kontinuierlichen Spannungsmodus (Reduzierung der Amplitude und Erhöhung der Grundspannung) beim Metall-Ionensputtern.

Tabelle 2: Optimale Impulsparameter für das Ionensputtern und die Schichtabscheidung

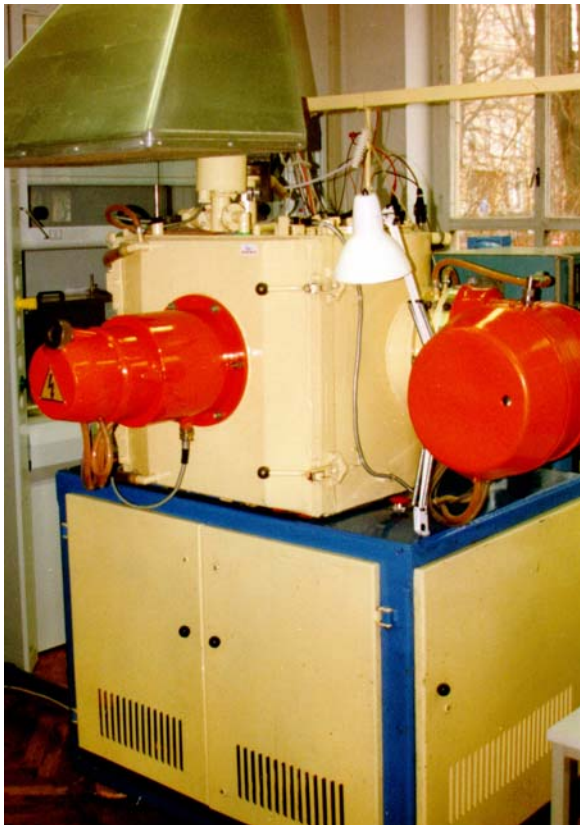
Plasmaprozess	Grundspannung (V)	Impuls:Pause	Amplitude (V)
Argon-Ionensputtern, 2 Pa	640	Rampe: 1 → 6	1400
Argon-Ionensputtern, 0,3 Pa	Rampe: 0 → 200	1	2000
Metall-Ionensputtern	Rampe: 200 → 1000	2	Rampe: 2000 → 0
Schichtabscheidung (warm)	210	2	0

### 3.2.2.2 Gefiltertes Vakuumlichtbogen-Ionenplattieren

Das Vakuumlichtbogenverfahren hat gegenüber anderen Beschichtungsverfahren einen wesentlichen Nachteil, die prozeßbedingte Erzeugung von Makropartikeln, bestehend aus geschmolzenem Kathodenmaterial (s. *Bild 2*). Der Einbau dieser Schmelztröpfchen (Droplets) mit einem Durchmesser im Bereich von ein bis

hundert Mikrometern in die Beschichtungen kann je nach spezieller Anforderungen an die Schicht- und Oberflächenqualität katastrophale Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Schichten haben. Beispielsweise können Beschichtungen mit hohen Dropletverunreinigungen in den Spannuten der Zerspanwerkzeuge oder den formgebenden Flächen von Umform- und Stanzwerkzeugen nur zu unbefriedigenden Leistungen führen. Diesen hohen Anforderungen entsprechend werden zunehmend Dropletfiltersysteme für Vakuumlichtbogenverdampfer, zum Beispiel die gefilterte Plasmaquelle „Separator“, eingesetzt.

### 3.2.3 Beschichtungsanlage



Kernstück des Beschichtungslabors bildet die Beschichtungsanlage NNV6.6-I5, Fa. VIRTUS, Moskau. Anlagen der Baureihe NNV6.6 werden seit mehreren Jahren vom Kooperationspartner MSTU „STANKIN“ zur Beschichtung und Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von Beschichtungstechnologien, wie z.B. der KIB-Methode, eingesetzt (*Bild 4*).

Bild 4: Kammer der Beschichtungsanlage NNV 6.6 mit Verdampfern und Gestell

### 3.2.3.1 Aufbaustruktur der Beschichtungsanlage

Hauptbestandteil der Anlage ist das Grundgestell (A) (*Bild 5*) mit Vakuumkammer, Verdampfern, Vakuumsystem einschließlich Pumpen und Ventilen, Gasmischeinrichtung, Heiz- und Kühlsystem, Drehtischantrieb sowie Messeinrichtungen für Temperatur und Druck. Weiterhin gehören zur Anlage ein Spannungsregler mit Transformator (B), ein Hauptschaltschrank (C) für den Netzanschluß, Schaltschränke für die Steuerung der o.g. Komponenten (D), für die Steuerung des Separators (E) und für die Regelung der Substratspannung (F) sowie drei Transformatoren für den Betrieb der Verdampferquellen (G).

Die doppelwandige Vakuumkammer ist kühl- und aufheizbar; Chargierung und Dechargierung der Kammer erfolgen durch eine 600x600 mm<sup>2</sup> große Kammertür. Das Vakuumpumpensystem besteht aus einer Rotations- und einer Diffusionspumpe. Der schematische Aufbau der Beschichtungsanlage ist in *Bild 6* dargestellt.

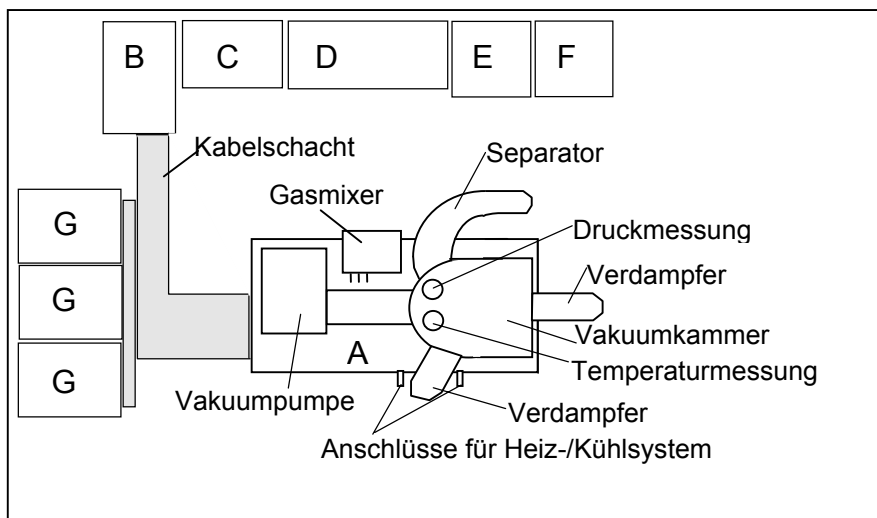


Bild 5: Stellplan der Beschichtungsanlage NN6.6-I5 mit einzelnen Komponenten

An der Anlage befinden sich 2 konventionelle Vakuumbogenverdampfer-Plasmaquellen, deren Aufbau in *Bild 7a* dargestellt ist. In der dynamischen Gasmischeinrichtung können außerhalb der Kammer Mischverhältnisse von Gemischen aus bis zu drei Gasen hergestellt werden. Das Vakuumdruckmesssystem besteht aus einem Kombinationsgerät nach

thermoelektrischem (Pirani-) und Ionisationsprinzip. Es wird ergänzt durch einen gasartunabhängigen Absolutdruckaufnehmer (Baratron) für den Bereich  $1 \times 10^{-2} \dots 99 \text{ Pa}$ , Fa. MKS. Die Temperatur wird mittels zweier separater Temperaturerfassungssysteme, ein Mantelthermoelement und ein rechnergesteuertes Bandpyrometer BP50, Fa. Compotharm/Migge, gemessen und überwacht.

Neben einer Plasmaquelle zur Separation des Ionenstromes von den Neutralpartikeln, kurz Separator genannt (*Bild 7b*), besitzt die Anlage zwei weitere neuartige Einrichtungen - ein Hochspannungsgenerator zur Erzeugung einer gepulsten Substratvorspannung, der eine kontinuierliche Basis-Gleichspannung überlagert wird, und eine Potentialumschalteneinrichtung an einer konventionellen Verdampferelektrode.

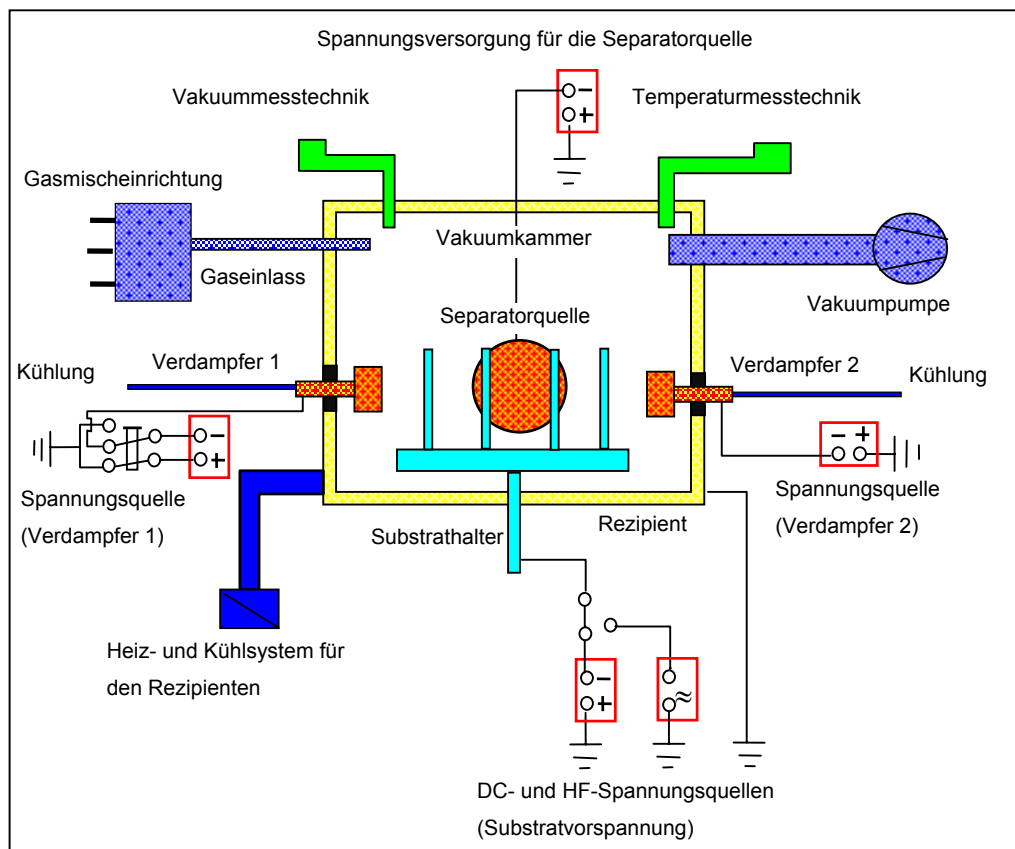


Bild 6: Schematischer Aufbau der Beschichtungsanlage NNV6.6-I5

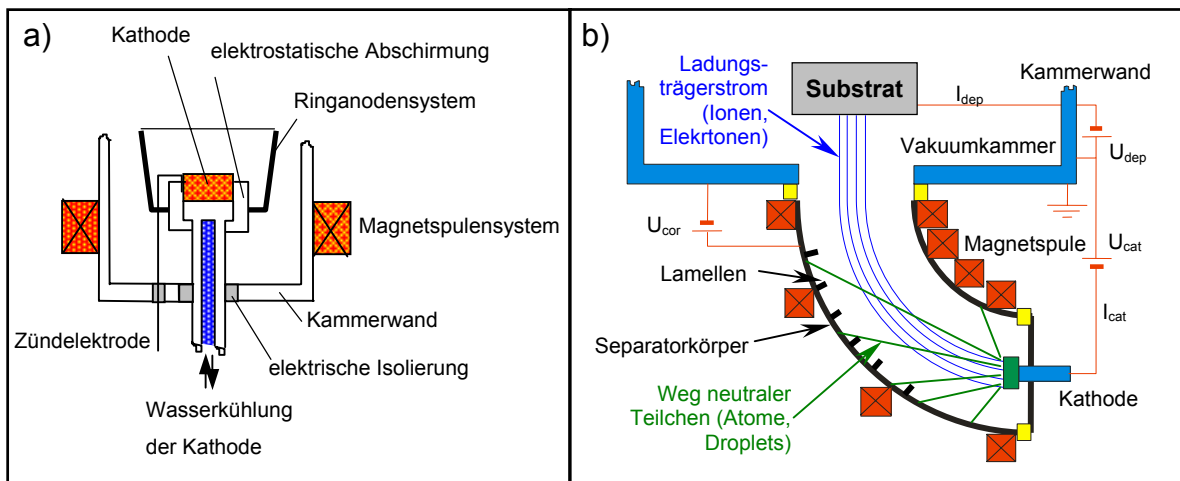


Bild 7: Vakuumlichtbogenverdampfer konventioneller Bauart a) und Separatorart b)

An der für die Untersuchungen verwendeten Beschichtungsanlage wurde eine gefilterte Plasmaquelle „Separator“ eingesetzt, siehe *Bild 7b*. Diese Quelle besitzt einen 90°-Toruskörper mit einer ihn umfassenden Magnetpule. Am Innenrand der Plasmaquelle befinden sich lamellenartige Blenden, die einen Transport von Makropartikeln infolge von Wechselwirkungen mit dem Ionenstrom verhindern. Das Plasma wird an der Kathode mittels Vakuumlichtbogenverdampfung erzeugt. Die Elektronen werden entlang der Magnetfeldlinien in die Vakuummur geleitet. Zur Aufrechterhaltung der Plasma-Quasineutralität müssen die Ionen den Elektronenbahnen in einem Ionenstrom mit höchster Dichte entlang der Röhrenmitte in den Rezipienten folgen. Die Neutralpartikel, darunter die Droplets, werden durch das Magnetfeld nicht beeinflusst, bewegen sich von der Kathode geradeaus zur Separatorinnenwand und werden dort abgeschieden. Die Bezeichnung der Plasmaquelle ergibt sich folglich aus der Funktionsweise: Geladene Partikel werden separiert von den ungeladenen. Der Korpus der gefilterten Plasmaquelle kann positiv vorgespannt werden, um die Ionen-Transferrate aufgrund elektrostatischer Abstoßung der positiven Ionen von der Innenwandung zu erhöhen. Zur Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Separators wurden die Charakteristiken der wichtigsten Steuerparameter aufgenommen und in den Bildern 6a-c gezeigt [66]. Es wurden die Parameter Torusspannung, Argonpartialfluss und Verdampferstrom variiert und deren Einfluss auf den Beschichtungsstrom als Maß für das Bombardement mit Ionen an einem Substratstandard untersucht. Wie aus *Bild 7a* ersichtlich, ist das Vorspannen des



Separatorkörpers (Torus) sehr gut geeignet, um Metallionen, hier wurde praxisrelevant die Verdampfung von Aluminium untersucht, mit reproduzierbar einstellbaren Raten zu erzeugen und auf die Substrate zu lenken. Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass beim Fehlen einer Torusspannung kein Metall abgeschieden wird, der Rest-„Beschichtungsstrom“ ergibt sich hier ausschließlich aus dem Bombardement mit Argonionen. In diesem Zusammenhang muss betont werden, dass für einen stabilen Betrieb des Separators Argon-Arbeitsatmosphäre mit einem Druck von mindestens 0,2 Pa unbedingt notwendig ist. Bei der Abscheidung von AlN in Argon-Stickstoff-Atmosphäre, die beispielsweise bei der Herstellung von TiAlN-Multilayer-Beschichtungen angewendet wird, geht der Ionenstrom für hohe Torusspannungen in Sättigung und erreicht nicht die Werte der Al-Abscheidung. Hier muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass der Kennlinienaufnahme eine längere AlN-Abscheidung vorausging. Daher werden die Absolutwerte und die Sättigung erstens auf die Bildung von AlN an der Kathodenoberfläche und der dadurch bewirkten geringeren Verdampfungsrate und zweitens auf die geringere Ionisation des Stickstoffs gegenüber der des Argons zurückgeführt. Der Beschichtungsstrom für AlN geht mit sinkender Torusspannung weniger zurück als bei der Al-Verdampfung in Argon bei einem Druck von 0,2 Pa, weil der praxisrelevante höhere Druck von 0,5 Pa zu einem stärkeren Gasionen-Ladungstransport führt und außerdem eine geringe Aluminiumpassage des Filters aufgrund höherer Partikelstreuung bei höherem Druck auftrat. Als Indiz für letztere Aussage wurde reproduzierbar eine dünne Beschichtung des Substrats mit transparentem AlN (Interferenzfarben Grün bis Blau) beobachtet.

*Bild 8b* zeigt einen mit zunehmendem Argonpartialfluss steigenden Beschichtungsstrom. Dieser Effekt untermauert die obigen Aussagen der stärkeren Ionisierbarkeit des Argons gegenüber Stickstoff und der starken Nitrid-„Vergiftung“ der Kathode bei hohem Stickstoffgehalt des Arbeitsgases. Die Beschichtungsströme sind nahezu linear abhängig vom Verdampferstrom, siehe *Bild 8c*. Die um 20% höheren AlN-Werte im Vergleich zu dem korrespondierenden Wert in *Bild 8a* ergeben sich aus dem Fakt, dass die Kennlinien in *Bild 8b* und *Bild 8c* mit einer gereinigten Kathode, d.h. ohne anfängliche AlN-Bedeckung aufgenommen wurden.

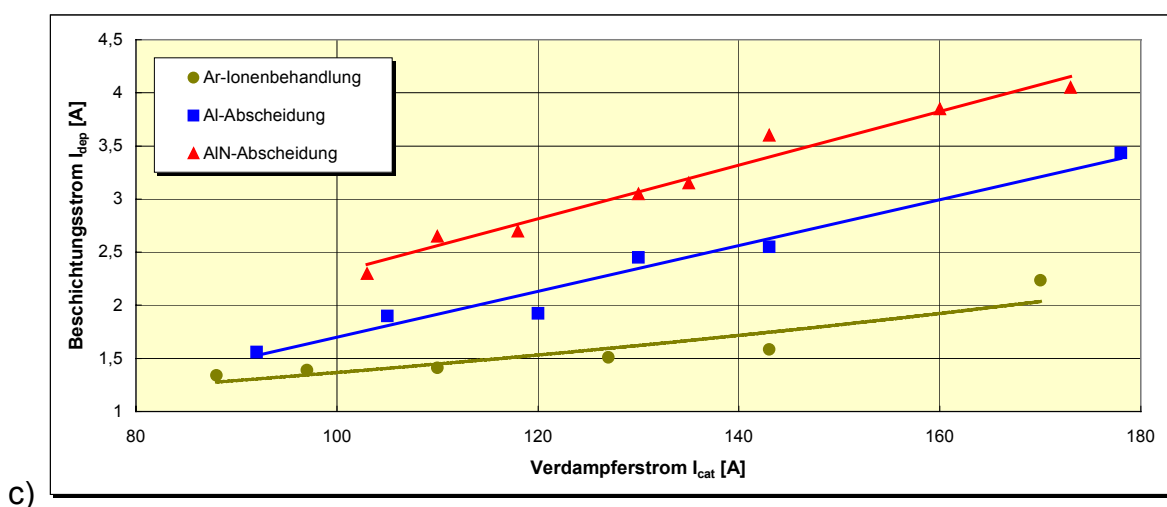
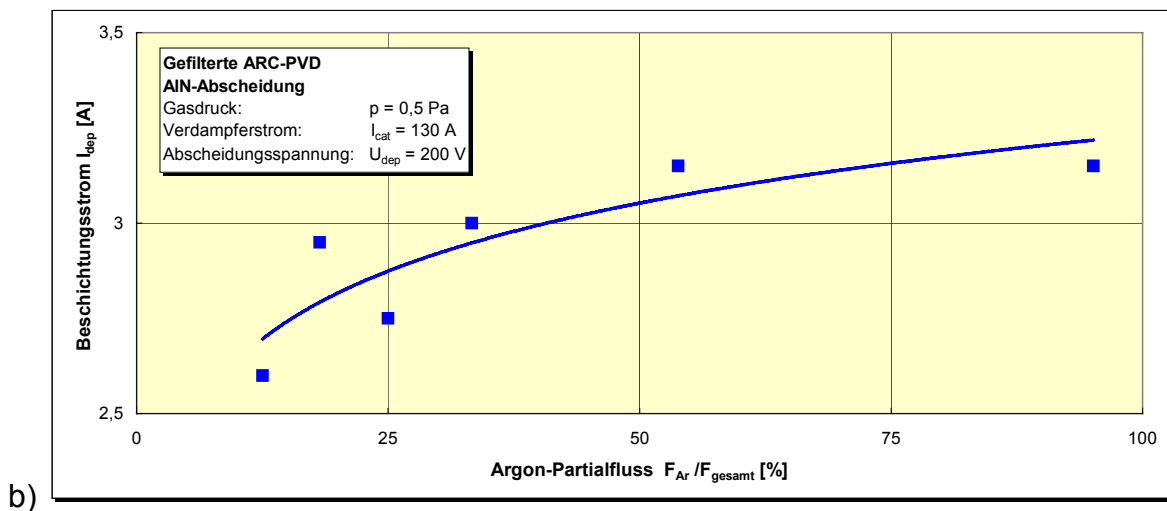
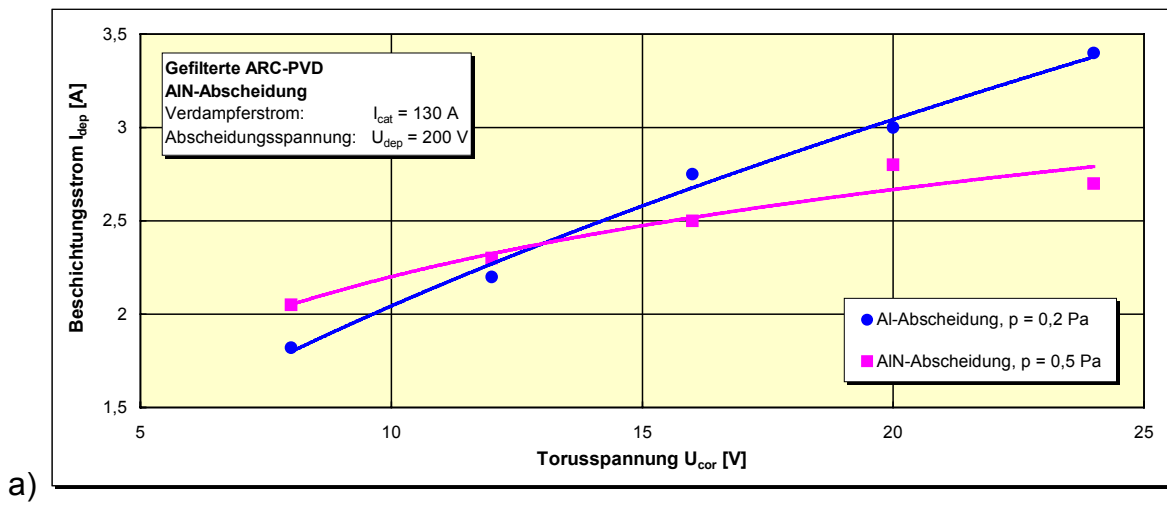


Bild 8: Arbeitskennlinien des Separators

Der Separator wurde bei der Probenherstellung ausschließlich zur Aluminiumverdampfung eingesetzt, um den Einbau von Aluminiumdroplets mit typischen Durchmessern von bis zu hundert Mikrometern zu verhindern. Durch die Möglichkeit des Ausfilterns der Metallionen bei fehlender Torusspannung konnte der Separator als Gasionen- und Elektronenquelle eingesetzt werden. Auf diese Art und Weise wurden metallionenfreie Plasmaprozesse, wie die erzwungene Glimmentladung, bei einem typischen Druck von 0,2 Pa realisiert, die als Basisprozess für die Methoden Ionenreinigen und Elektronenheizen diente. Es wurde nachgewiesen, dass mit der gefilterten Vakuumlichtbogenquelle „Separator“ eine vollständige Unterdrückung des Dropletteinbaus in die Schicht realisiert werden kann [67].

### 3.2.3.2 Funktionsprinzip der Beschichtungsanlage

Mittels dreier am Umfang der Vakuumkammer angebrachter Vakuumbogen-Verdampferquellen wird in der Vakuumkammer ein Plasma (hochgradig ionisierter Metaldampf) erzeugt, das die zuvor eingelegten Substrate (z.B. Metall-Bauteile) umgibt. Durch Zugabe von Reaktivgasen und Anlegen einer Substratspannung lassen sich verschiedenste Hartstoffschichten auf den Substraten abscheiden. Das Verfahren der kombinierten Ionenstrahl- und -beschichtungstechnologie, für das die Anlage konzipiert ist, wird insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass vor, während (Ionenplattieren) und gegebenenfalls nach der Schichtabscheidung ein Ladungsträgerbeschuss (Ionen, Elektronen) der Substrat- bzw. Schichtoberfläche realisiert werden kann. Die so erzeugten Beschichtungen zeigen gegenüber konventionell erzeugten Schichten neue, verbesserte Eigenschaften basierend auf deren, durch das Ladungsträgerbombardement modifizierten Struktur.

Durch den Einsatz der neuen Beschichtungsmodule Separator, Pulsspannungsgenerator und Elektrodenpotentialumschaltung wird eine Effektivitätssteigerung der Beschichtungsanlage ermöglicht, die sich in der Qualität der Beschichtungen niederschlägt.

## 3.2.3.3 Technische Daten der Beschichtungsanlage

Druck:	
minimaler Kammerdruck	$10^{-4}$ Pa
Arbeitsdruck in der Kammer	$10^{-1}..10^{-3}$ Pa
Verdampferstrom (Bogenstrom):	
/ konventioneller Verdampfer	60..100 A
/ mit Separatorquelle	150..200 A
Substratvorspannung (Bias):	
/ DC-Grundspannung	+35..-1600 V
/ Rechteck-Impulsspannung	0..500 V
/ Impulsfrequenz	2..4 kHz
/ Impuls-Pause-Verhältnis	0,25..4
/Amplitudenverhältnis: $U_{\max,puls} / U_{grund}$	1,25
Substratbezogene Daten:	
Substrattemperatur	200..800 °C
maximale Substratmasse (gesamt)	50..60 kg
Kammervolumen	(600 mm x 600 mm)

## 4 HERSTELLUNG UND PHYSIKALISCHE CHARAKTERISIERUNG BESCHICHTETER PROBEN

### 4.1 Probenherstellung

Für die Untersuchungen wurden Hartmetallwendeschneidplatten der Firma WIDIA benutzt. Diese Platten hatten eine Form SNMG120408 (siehe *Bild 9*), Hartmetallsorte TTM und Verwendungsgruppe P25.



Bild 9: Visuelle Darstellung der für die Untersuchungen eingesetzten Wendeschneidplatten



Bild 10: Aufstellung der zu beschichtenden Wendeschneidplatten in der Vakuumkammer der Beschichtungsanlage

An der Beschichtungsanlage NNV6.6-I5 wurden diese Wendeschneidplatten mit verschiedenen Schichtsystemen auf TiAlN-Basis beschichtet. Die zu beschichtenden Wendeschneidplatten wurden in der Vakuumkammer der Beschichtungsanlage am Drehtisch mit Planetengetriebe installiert (*Bild 10*).

### 4.1.1 Parameter des Beschichtungsprozesses

Alle in der Beschichtungsanlage NNV6.6-15 beschichteten Werkzeuge wurden nach der kombinierten Ionenstrahl- und -beschichtungstechnologie behandelt. Ein solcher Behandlungsprozess umfaßt die Teilprozesse:

- Plasmavorbehandlung der unbeschichteten Substratoberfläche;
- Ionenplattier-Beschichtungsprozess;
- Plasmaendbehandlung der beschichteten Substratoberfläche.

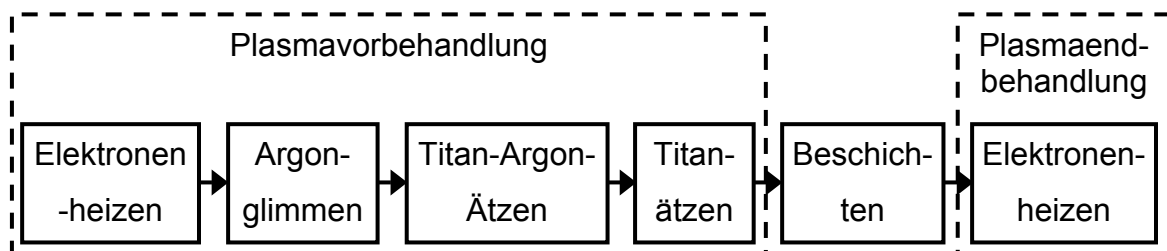


Bild 11: Schematischer Ablauf des Behandlungsprozesses

Tabelle 3: Parameter der Plasmavor- und Plasmaendbehandlungsprozesse

Lfd. Nr.	Prozess	Prozessdauer, min	Prozessgasdruck, Pa	Substratspannung, V	Strom der Separator-Kathode, A	Strom des Titan-Verdampfers, A
1	Elektronenheizen	8	0,36	+20	120	+65
2	Argon-Glimmen	5	2,0	100DC/900AC f = 10kHz, 2:1	-	-
3	Titan-Argon Ätzen	1,5	0,1	-1000 DC	-	-55
4	Titan-Ätzen	1,5	0,06	-800 DC	-	-55

Der schematische Ablauf des Plasmabehandlungsprozesses ist in *Bild 11* veranschaulicht. Der sich in Voruntersuchungen als der effektivste Plasmavor- bzw. Plasmaendbehandlungsprozess herausgestellte Ablauf untergliedert sich,

wie in *Bild 11* dargestellt. Gemäß dieser Oberflächenvorbehandlung wurden alle Proben auf den nachfolgenden Ionenplattier-Beschichtungsprozeß vorbereitet bzw. nach der Beschichtung endbehandelt. Die Parameter der Plasmavor- und Plasmaendbehandlungsprozesse sind in *Tabelle 3* dargestellt. Wie aus dieser Tabelle ersichtlich ist, werden alle Proben gleich bzw. mit gleichen Parametern vor- und nachbehandelt.

#### 4.1.1.1 Schichtaufbau

Das Beschichten, im Vergleich mit der Plasmavor- und Plasmanachbehandlung, wurde unter unterschiedlichen Abscheidungsparametern durchgeführt. Als zu variierende Abscheidungsparameter wurden der Kathodenstrom, die Substratspannung, der Gasdruck und -fluss bei der Deckschichtabscheidung und der Schichtaufbau ausgewählt. Diese Parameter werden im physikalisch sinnvollen Rahmen variiert. Die Abscheidungsparameter der TiAlN-Deckschicht und deren Variationsgrenzen sind in *Tabelle 4* dargestellt.

Tabelle 4: Zu variierende Abscheidungsparameter der TiAlN-Deckschicht

Abscheidungsparameter	Variationsgrenzen
Strom der Titan-Kathode, A	45...130
Gasdruck, Pa	0,1...0,8
Substratspannung, V	90...250
Schichtaufbau	Verschiedene Zwischenschichten
Strom der Aluminium-Kathode, A	160

Der Schichtaufbau des Verschleißschutzkomplexes basiert auf dem Prinzip der mehrlagigen Beschichtungsarchitektur (siehe Kapitel 2.3). Anhand dieses Prinzips wurden einige Verschleißschutzkomplexe auf TiAlN-Basis entwickelt und hergestellt, deren schematischer Aufbau *Bild 12* zeigt. Als Optimierungskriterium bei diesen Varianten wurde die Verbesserung der Adhäsion zwischen dem Substrat (Hartmetall) und der Deckschicht (TiAlN) ausgewählt. Selbst bei hohen

Schichthärten, also bei entsprechend hohen Schichteigenspannungen, sollten ausreichend haftere Beschichtungen abgeschieden werden.

Beschichtungsarchitektur	Schichten	Abscheidungsdauer, min
	TiAlN TiN Ti Substrat (Hartmetall)	20 20 1
	TiAlN Ti Substrat (Hartmetall)	40 1
	TiAlN TiN TiCrN Ti Substrat (Hartmetall)	20 2 20 1,5

Bild 12: Schematischer Aufbau der mehrlagigen Verschleißschutzkomplexe

## 4.2 Charakterisierung von Hartstoffschichten

### 4.2.1 Anforderungen an Verschleißschutzschichten

An Verschleißschutzschichten auf Zerspanwerkzeugen werden besondere Anforderungen gestellt, die sich aus den bei der Spanabnahme auftretenden Belastungen ableiten lassen. Neben thermischer und mechanischer Überbeanspruchung, die zur plastischen Deformation oder zum Bruch der Schneide führen, treten als Verschleißursachen hauptsächlich Abrasions- und Adhäsionsmechanismen sowie Diffusionsprozesse auf. Diese überwiegend



mechanischen Beanspruchungen der Werkzeugoberfläche tragen insbesondere zum Freiflächen- und Spanflächenverschleiß (Kolkverschleiß) bei. Daraus lassen sich zur Erhöhung des Verschleißwiderstandes folgende grundlegende Anforderungen an das Werkzeug ableiten: hohe Warmhärte, thermische Stabilität, chemische Beständigkeit, gute Zähigkeit [1, 3, 4, 68, 69].

Dies impliziert die folgenden maßgeblich geforderten Eigenschaften von Hartstoffschichten auf Zerspanwerkzeugen [4, 69]:

- hohe Härte, um dem Abrasionsverschleiß entgegenzuwirken,
- hohe chemische Beständigkeit,
- hohe thermische Stabilität,
- hohe Schichthaftung,
- hohe Festigkeit der Schicht, um dem Diffusions- und Adhäsionsverschleiß (Kolk) entgegenzuwirken, sowie
- optimale Schichthomogenität und -dicke.

Durch Oberflächenbehandlung und Beschichtung von Zerspanwerkzeugen besteht die Möglichkeit, mehrere, jeweils für Einzelbeanspruchungen optimierte Schichten und oberflächennahe Werkstoffbereiche des Werkzeuges zu kombinieren, um den komplexen Anforderungen des auf das Zerspanwerkzeug wirkenden Beanspruchungskollektivs gerecht zu werden [3, 4].

So muss das Substrat eine ausreichende Festigkeit und Härte für die Aufnahme der mechanischen Belastungen besitzen. Für den nötigen Widerstand gegen Abrasionsverschleiß sorgt eine Hartstoffbeschichtung der Werkzeugoberfläche. Diese kann durch günstige Gleiteigenschaften in der Paarung mit dem Werkstückwerkstoff sogar die thermische Belastung des Werkzeuges verringern, da in diesem Falle ein großer Teil der beim Spanen entstehenden Wärme mit dem Span abgeführt wird. Die chemischen Zusammensetzungen von Hartstoffschicht und Werkstückwerkstoff haben einen großen Einfluss auf den stattfindenden Diffusionsverschleiß. Um dem Adhäsionsverschleiß (z.B. Schichtablösung) zu begegnen, sind hohe Festigkeit des Schichtmaterials und sehr gute Haftfestigkeit der Hartstoffschicht auf dem Substrat erforderlich.

### 4.2.2 Beurteilung der Schichtqualität

Aus den genannten erforderlichen Eigenschaften des Systems „Werkzeug - Hartstoffschicht“ lassen sich eine Reihe von Parametern ableiten, die zur qualitativen und quantitativen Beurteilung der entsprechenden Schichteigenschaften herangezogen werden können. Hier wird eine Einteilung in primäre, schichtorientierte physische Parameter (Schichtparameter) und sekundäre, anwendungsorientierte Parameter (technische, technologische, dekorative Parameter) vorgeschlagen. Die anwendungsorientierten Parameter stellen eine Vergleichsgröße zur Beurteilung des Gesamtverhaltens einer Schicht bezüglich einer definierten komplexen Beanspruchung dar, während die Schichtparameter oft nur eine spezielle Eigenschaft charakterisieren. Diese können mit geeigneten Mess- und Prüfverfahren relativ einfach bestimmt werden, während zur Ermittlung der anwendungsorientierten Parameter meist aufwendige praktische Versuche erforderlich sind. Diese könnten durch die Entwicklung von Modellen für das beanspruchungsabhängige Zusammenwirken verschiedener Schichtparameter ersetzt werden, was zu einer erheblichen Vereinfachung und Verkürzung der anwendungsorientierten Schichtprüfung beitragen würde. Das Zusammenwirken einzelner Schichtparameter ist je nach Beanspruchungen und Randbedingungen verschieden und sehr komplex, was sich nachteilig auf die Modellentwicklung auswirkt. Als Alternative können Kurzprüfverfahren entwickelt und eingesetzt werden, die jedoch nur für eine spezielle Anwendung gestaltet sind [4, 70, 71, 72].

Für Zerspanwerkzeuge existieren bisher keine Kurzprüfverfahren zur Ermittlung des Verschleiß-Standzeit-Verhaltens, die die Durchführung praxisnaher Verschleißversuche ersetzen könnten. Somit ist es für die Beurteilung der Qualität von Werkzeugbeschichtungen unerlässlich, verschiedene, für das vorliegende Beanspruchungskollektiv maßgebliche Schichtparameter zu ermitteln und anschließend die beschichteten Werkzeuge in Standzeitversuchen unter praxisrelevanten Bedingungen auf ihre Verschleißfestigkeit zu testen.

### 4.2.3 Schichtparameter

Als wichtige Qualitätsparameter von Hartstoffbeschichtungen werden oft an erster Stelle die Härte des Beschichtungsmaterials sowie die Schichtdicke genannt. Diese Eigenschaften sind mit vergleichsweise geringem gerätetechnischen und zeitlichen Aufwand zu bestimmen. Sie bilden damit eine gute Grundlage für die Charakterisierung verschiedener Beschichtungen sowie für den Vergleich von Beschichtungen anhand weiterer Parameter untereinander. Sowohl die Härte als auch die Schichtdicke wirken im Wesentlichen dem Abrasionsverschleiß entgegen. Bei der auftretenden komplexen Beanspruchung müssen aber noch andere Mechanismen berücksichtigt werden. So ist auch die Adhäsion der Schicht auf dem Substrat von entscheidender Bedeutung, die sich qualitativ bzw. quantitativ mit einem Haftfestigkeitstest ermitteln lässt. Als weitere Parameter können die Zusammensetzung, die Oberflächenrauheit und die Struktur der Schicht untersucht werden.

Hier wird eine Einteilung in makroskopische bzw. mikroskopische schichtorientierte physische Eigenschaften und technologische anwendungsorientierte Eigenschaften verwendet.

## 4.3 Makroskopische Eigenschaften der Hartstoffschichten

### 4.3.1 Schichtdicke

Die Schichtdickenmessung ist eine der wichtigsten Standardmessungen, die zur Charakterisierung dünner Schichten direkt im Anschluss an den Beschichtungsprozess erfolgt.

Die Schichtdicke kann sowohl mit der Kalottenschliffmethode (hier: selbstgebauter Kalotester, Kugeldurchmesser 20 mm) als auch mit der Methode des Beta-Rückstreuverfahrens (hier: Fischerscope MMS mit den Modulen Betascope und Permascope der Fa. Fischer in *Bild 15*) bestimmt werden [73, 74, 75].

Bei der Kalottenschliffmethode (DIN EN ISO 2177) trägt eine mit Diamantpaste benetzte, rotierende Stahlkugel bekannten Durchmessers an einer Stelle des

beschichteten Bauteils eine definierte Zeit Material ab (siehe *Bild 13*), so dass eine muldenförmige Schleifmarke (Kalotte) entsteht, die durch die Schicht hindurch bis in das Substratmaterial reicht (siehe *Bild 14*). Anhand des so entstandenen Schrägschliffes der Schicht kann nun nach einfacher Längenmessung des Kalottendurchmessers unter einem Messmikroskop die Schichtdicke hinreichend genau berechnet werden [4, 8, 76].

Beim Beta-Rückstreuverfahren (DIN EN ISO 3543, ASTM B567, BS 4511) wird das beschichtete Bauteil durch eine geeignete Strahlungsquelle radioaktiv bestrahlt (Beta-Teilchen) und die Rate der von Schicht- und Grundmaterial zurückgestreuten Strahlung gemessen (siehe *Bild 16*). Diese ist in signifikanter Weise abhängig von der Materialkombination Grundmaterial/Schichtmaterial (Ordnungszahl) und von der Dicke der Beschichtung, wobei für jede Kombination eine Normierung mit Mustern bekannter Schichtdicke vorzunehmen ist [8, 76].

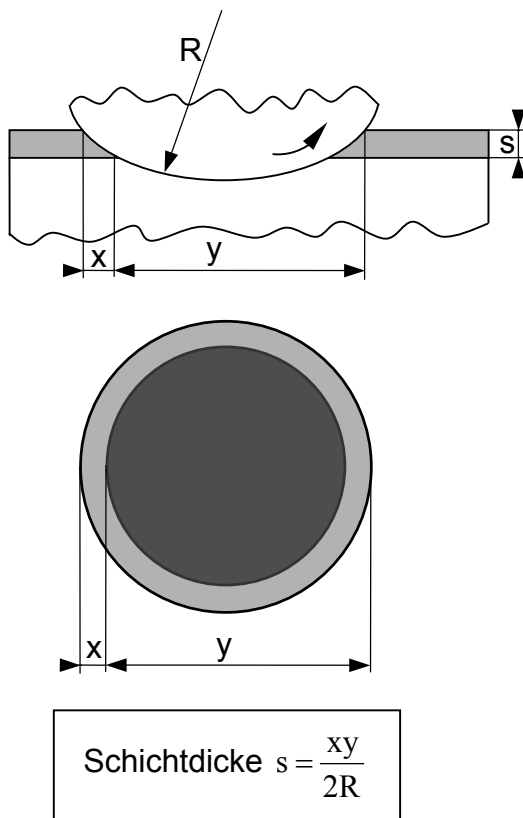


Bild 13: Schematische Darstellung der Kalottenschliffmethode

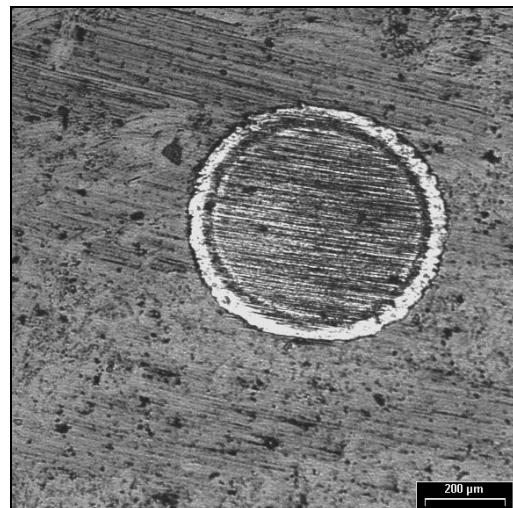


Bild 14: Kalotte auf einer TiAlN-Schicht



Bild 15: Fischerscope MMS mit dem Betascope-Modul und dem Messtisch

(Quelle: Helmut Fischer GmbH + Co)

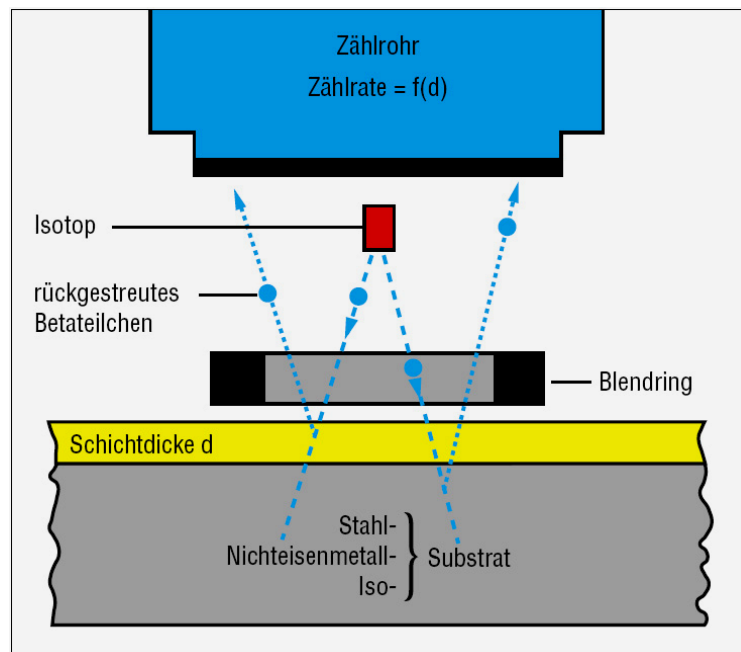


Bild 16: Schema des Beta-Rückstreuerverfahrens (Quelle: Helmut Fischer GmbH + Co)

Die Messdaten wurden durch den Einsatz der Verfahren Kalotest erfasst. In *Bild 17 und Bild 18* werden die mittleren Schichtdicken für verschiedene Beschichtungsvariationen auf Wendeschneidplatten gegenübergestellt. Bei den beschichteten Wendeschneidplatten lag die Schichtdicke, d.h. bei mehrlagigen Beschichtungen die Gesamtschichtdicke, im Bereich zwischen 2,1 und 3,7  $\mu\text{m}$ . Diese Ergebnisse haben gezeigt, dass die Dicke der hergestellten Beschichtungen

von den Abscheidungsbedingungen abhängig ist. Je größer der Strom der Titan-Kathode ist, desto dicker wird die Schicht (*Bild 17*). Mit der zunehmenden BIAS-Spannung nimmt die Schichtdicke ab (*Bild 18*). Der Stickstoffdruck in der Kammer hat keinen Einfluss auf die Schichtdicke.

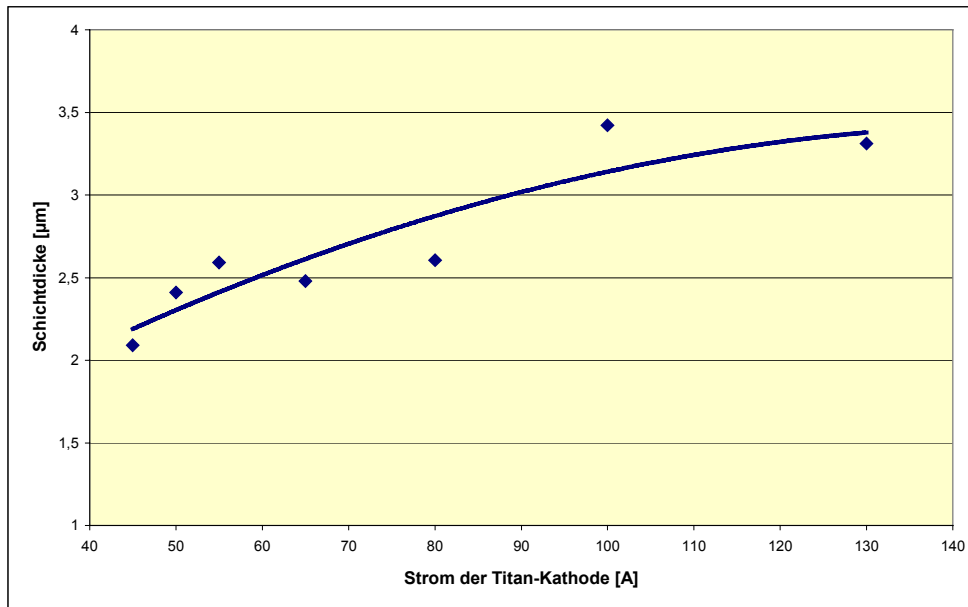


Bild 17: Abhängigkeit der Schichtdicke vom Strom der Titan-Kathode

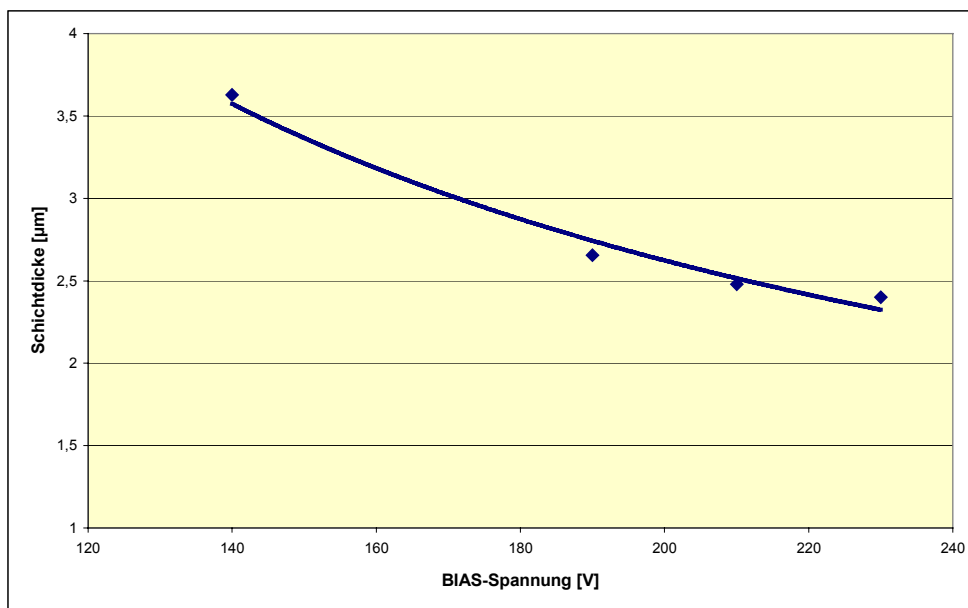


Bild 18: Abhängigkeit der Schichtdicke von der BIAS-Spannung

### 4.3.2 Schichthärte

Die Härte an der Oberfläche der beschichteten Werkzeuge ist ein wichtiger Parameter zur Charakterisierung von Verschleißschutzsystemen. Der Effekt der Verschleißreduktion wird im Wesentlichen auf die sehr hohe Härte der verwendeten Beschichtungen, deshalb auch deren Bezeichnung Hartstoffschichten, zurückgeführt.

Die Bestimmung der Kleinlasthärte (Vickershärte) nach DIN ISO 4516 und DIN EN ISO 6507-1 erfolgt mit einem entsprechenden Härteprüfgerät (hier: Härteprüfgerät Typ 3212001 der Fa. Zwick). Bei diesem Verfahren wird der Quotient aus Prüfkraft und Oberfläche eines bleibenden Eindrucks ermittelt, der mit einer quadratischen Diamantpyramide (Flächenwinkel  $136^\circ$ ) bei festgelegter Prüfkraft und Einwirkdauer erzeugt wurde. Der Härtewert lässt sich aus den, unter dem Messmikroskop ermittelten Diagonallängen des Eindrucks und der aufgewendeten Prüfkraft berechnen [5, 77] (siehe *Bild 19* und *Formel 1*).

$$\text{Vickers-Kleinlasthärte HV} = \frac{1,854F}{\left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)^2} \left[ \frac{\text{p}}{\text{mm}^2} \right] \quad (1)$$

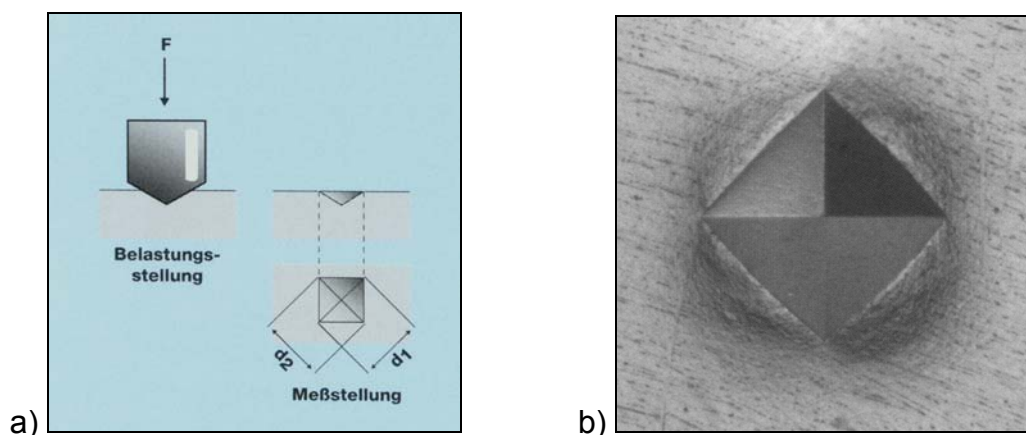


Bild 19: Schematische Darstellung der Kleinlasthärteprüfung a) und Eindruck des Indentors b)  
(Quelle: Zwick GmbH & Co)

Die Kleinlast-Vickershärte wurde mit der Last 50 Gramm gemessen (*Bild 20* - *Bild 23*). Die beschichteten Wendeschneidplatten sind um 1,5..2 mal härter als die

unbeschichteten bzw. Referenzplatten. Die Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmendem Strom der Titan-Kathode die Härte der Beschichtungen kleiner wird bzw. der Titan-Anteil in der TiAlN-Schicht größer wird (*Bild 20*). Je größer der Stickstoffdruck in der Vakuumkammer ist, desto härter und gleichzeitig spröder werden die Schichten (*Bild 21*). Mit zunehmender BIAS-Spannung wird die Härte der TiAlN-Schichten kleiner bzw. die Schicht wird dichter (*Bild 22*).

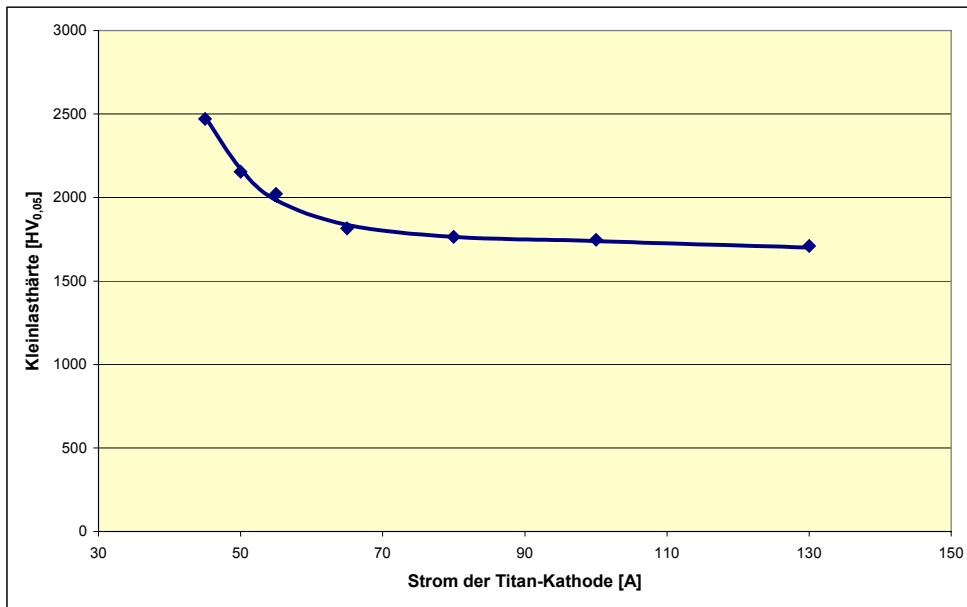


Bild 20: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte von dem Strom der Titan-Kathode



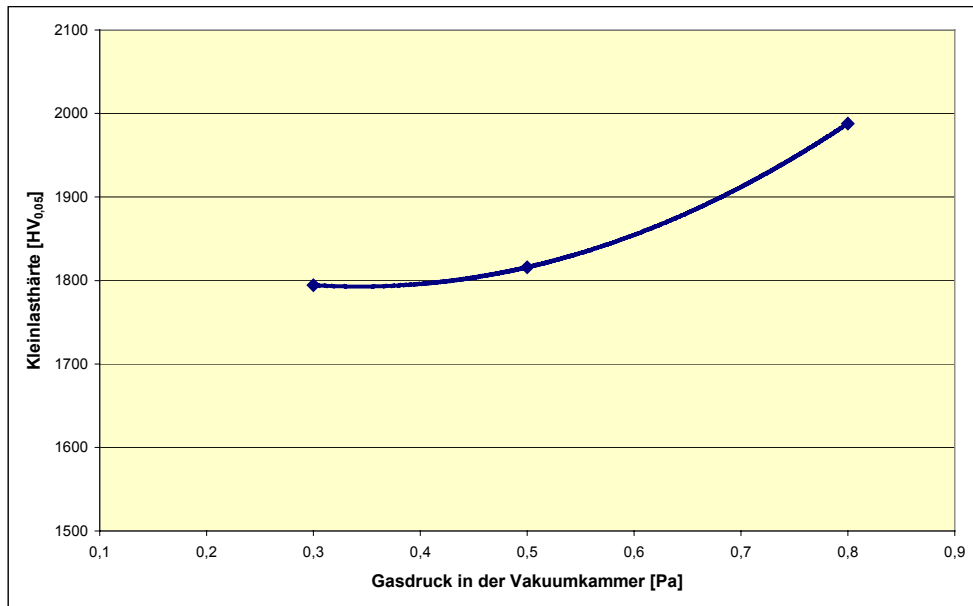


Bild 21: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte von dem Druck in der Kammer

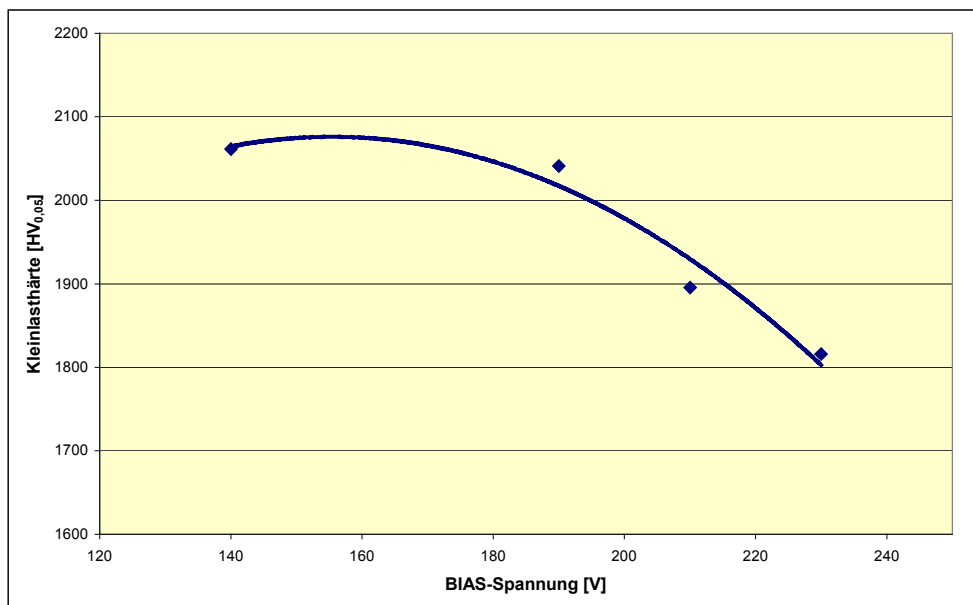


Bild 22: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte von der BIAS-Spannung

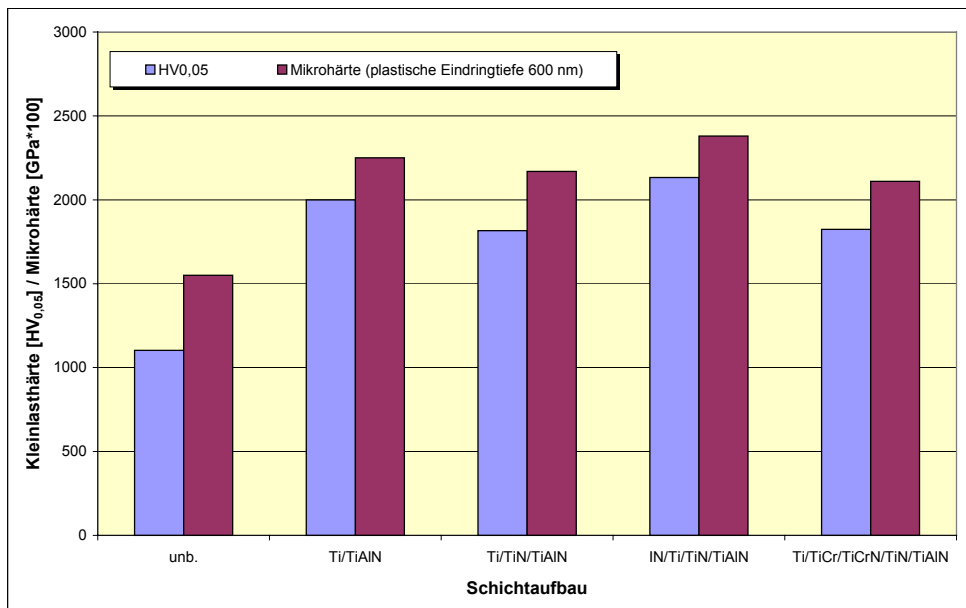


Bild 23: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte bzw. Mikrohärté vom Schichtaufbau

### 4.3.3 Schichthaftung

Die Haftfestigkeit der abgeschiedenen Schichten wurde entsprechend VDI-Richtlinie 3198 bewertet. Bei dieser Methode wird das nach einem HRC-Rockwell-Kegeleindruck nach DIN 50 103 T1 (3.84) durch Schichtablösungen entstehende Rissnetzwerk qualitativ beurteilt und den bestehenden Haftfestigkeitsklassen (HF) zugeordnet, siehe *Bild 24*. Dabei werden die Haftfestigkeitsklassen 1 bis 4 als zulässig, die Klassen 5 und 6 als nicht zulässig beurteilt.

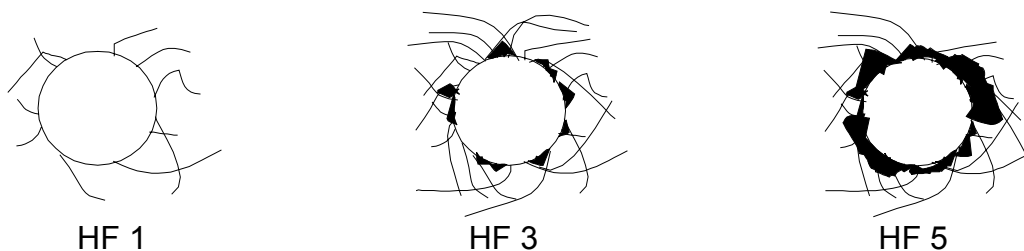


Bild 24: Schematische Darstellung der Haftfestigkeitsklassen nach VDI-Richtlinie 3198

Die Haftfestigkeit erwies sich bei allen Beschichtungsvariationen als ausreichend, d.h. eine unzureichende Schichtadhäsion, die den Haftfestigkeitsklassen 5 oder 6 entsprach, wurde nicht beobachtet.

Ein Ritztest (Scratchtest) hingegen bietet die Möglichkeit einer quantitativen Beurteilung der Haftfestigkeit (hier: Scratch-Tester der Firma CSEM REVETEST in *Bild 25*). Dabei wird ein Eindringkörper (bzw. Indentor) unter ständig steigender Last über die beschichtete Oberfläche bewegt, bis die Schicht reißt bzw. abplatzt, wobei die so ermittelte kritische Last ( $L_c$ ) ein Mass für die Haftfestigkeit der Schicht darstellt [8, 76]. In *Bild 26* sind die Scratchtest-Spuren dargestellt: *a* - Schicht hält, *b* - Schicht reißt bzw. platzt ab. Auf realen Werkzeugen und Bauteilen gestaltet sich jedoch die Anwendung des Ritztestes aufgrund komplexer Geometrien oft schwierig.

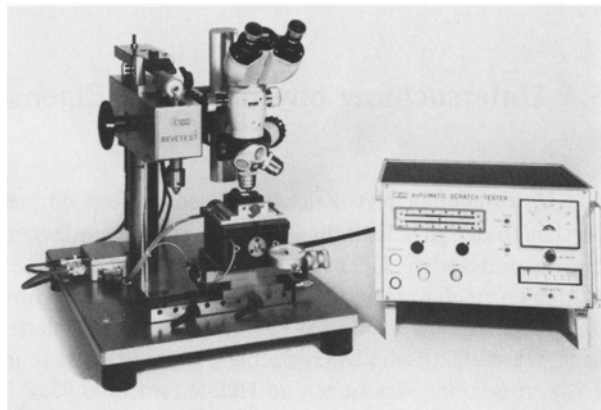
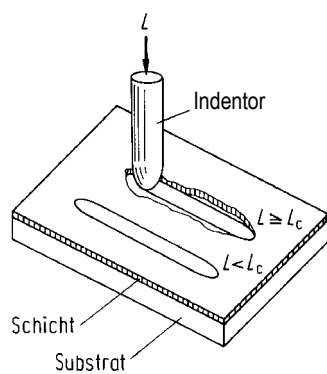


Bild 25: Ritztest zur Bestimmung der Haftfestigkeit der Schicht: Prinzip (links); Gerät (rechts)

Einige Scratchtestergebnisse sind in *Bild 27* - *Bild 29* dargestellt. Diese Ergebnisse bestätigen die Abhängigkeit der Schichthaftung bzw. der kritischen Last von den Abscheidungsparametern. Die Schichthaftung in der Abhängigkeit vom Strom der Titan-Kathode hat ein Extremum (Maximum) gegen 60..70 Ampere (*Bild 27*). Je größer die BIAS-Spannung ist, desto besser wird die Schichthaftung bzw. desto größer wird die kritische Last (*Bild 28*). Die kritische Last in der Abhängigkeit vom Stickstoffdruck hat ein Maximum gegen 0,5 Pa (*Bild 29*).

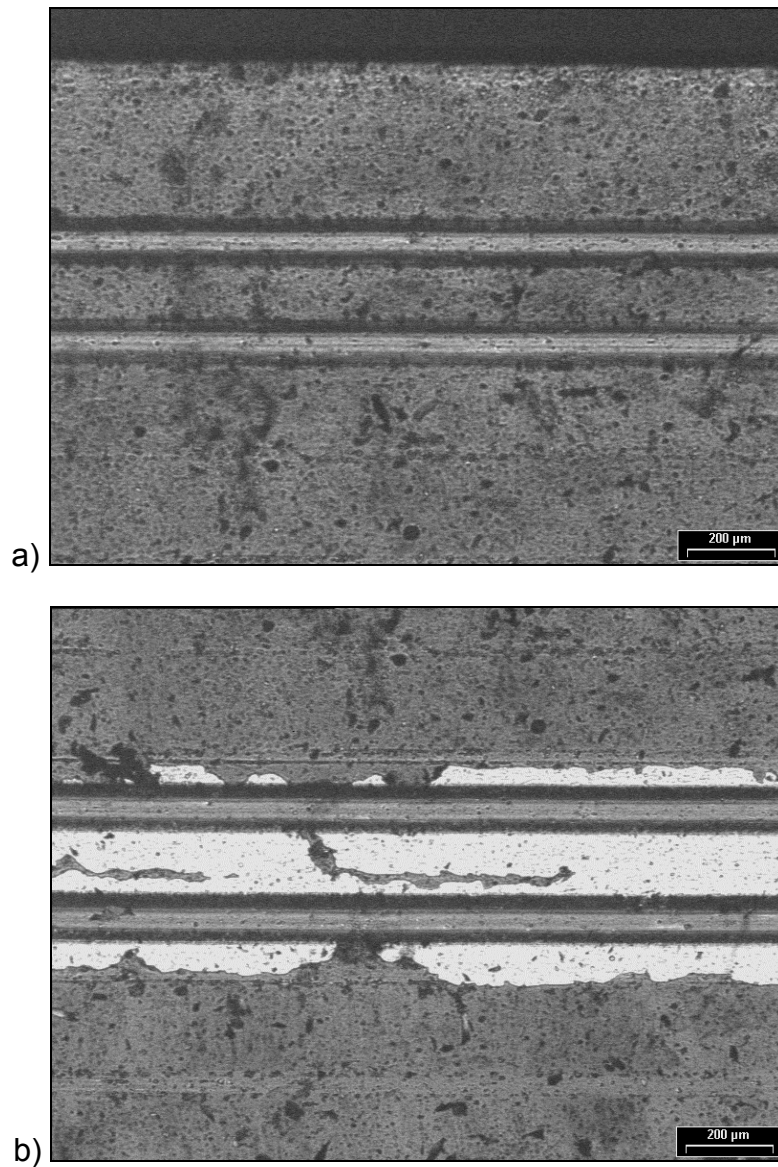


Bild 26: Typische Scratchtest-Spuren: a) Schicht hält; b) Schicht reißt bzw. platzt ab.

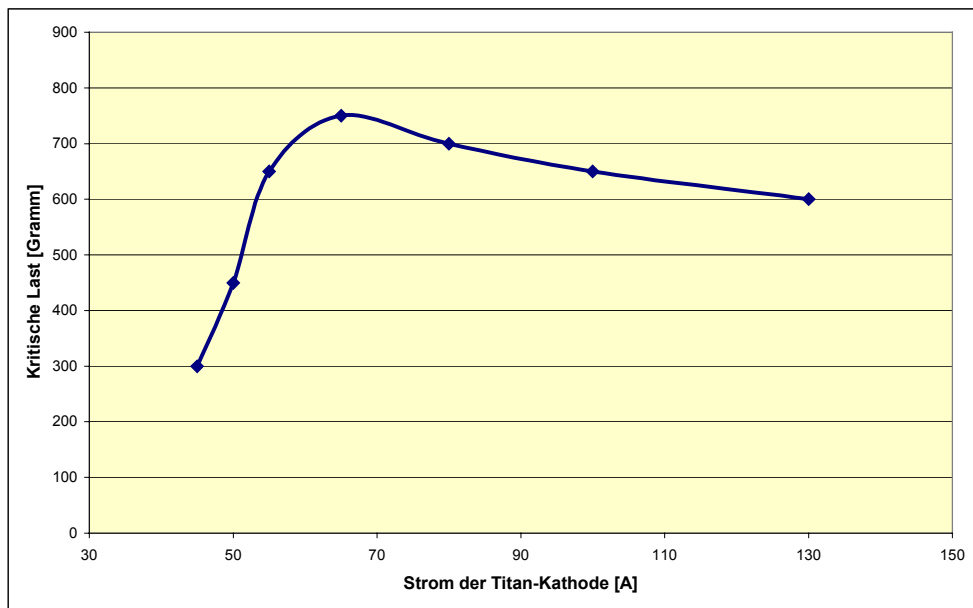


Bild 27: Abhängigkeit der Schichthaftung vom Strom der Titan-Kathode

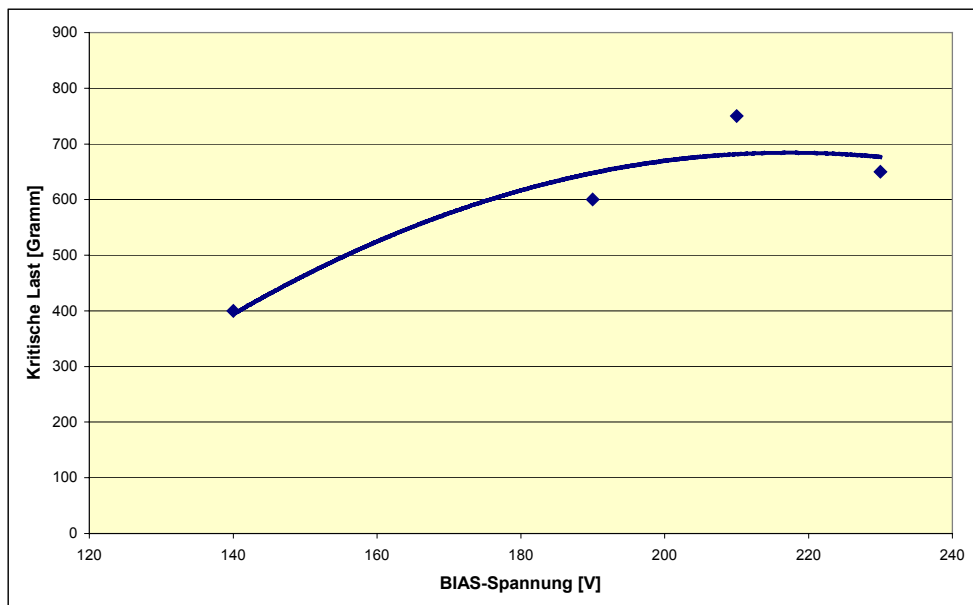


Bild 28: Abhängigkeit der Schichthaftung von der BIAS-Spannung

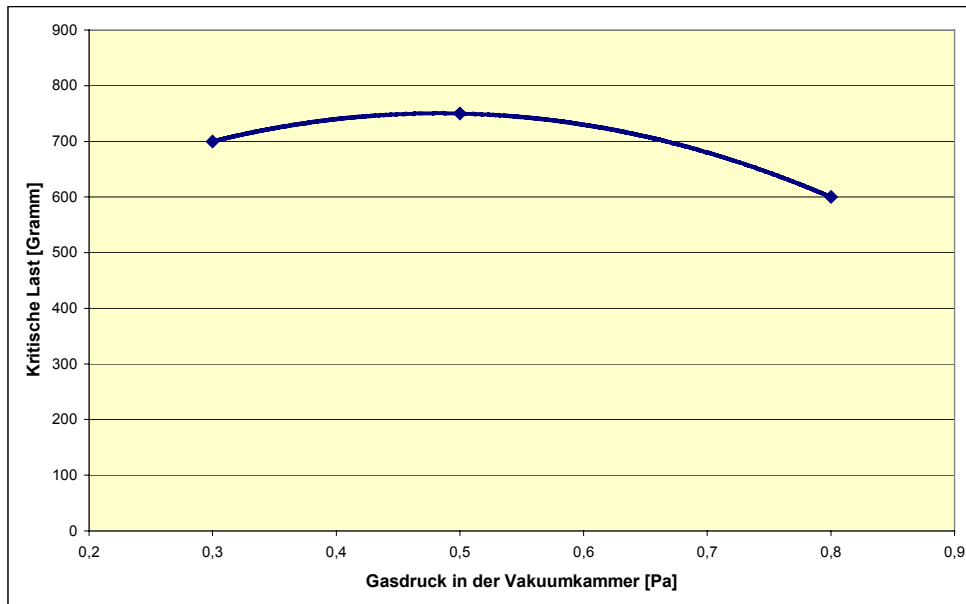


Bild 29: Abhängigkeit der Schichthaftung vom Druck in der Vakuumkammer

## 4.4 Mikroskopische Eigenschaften der Beschichtungen

### 4.4.1 Elektronenmikroskopische Strukturanalyse

Die Zusammensetzung der Beschichtungen kann mittels Röntgen-Mikrosondenanalyse unter dem Elektronenmikroskop ermittelt werden. Dabei wird die durch einen Elektronenstrahl hervorgerufene elementcharakteristische Röntgenstrahlung des Beschichtungsmaterials analysiert, wobei die Intensität der Strahlung Rückschlüsse auf den Anteil der jeweiligen Elemente in der Probe zulässt.

Aufbau und Struktur der abgeschiedenen Schichten lassen sich mit Hilfe der Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) untersuchen. Dabei wird ein zu untersuchender Oberflächen- oder Bruchquerschnittsbereich durch einen Elektronenstrahl „abgerastert“, was u.a. zur Emission von Sekundärelektronen aus der Probenoberfläche führt. Deren Austrittswahrscheinlichkeit hängt von der Oberflächenmorphologie ab und kann so zur Abbildung des topographischen Kontrastes genutzt werden [78].

Es wurden Untersuchungen der atomaren Verhältnisse der Metalle in ternären TiAlN-Beschichtungen und der Oberflächenmorphologie von beschichteten Hartmetall-Wendeschneidplatten an einem Rasterelektronenmikroskop JSM 4510 der Firma JEOL und DSM 950 der Firma ZEISS durchgeführt.

Die quantitative Bestimmung der atomaren Zusammensetzung der Beschichtungen erfolgte mittels standardfreier Mikrosonden-Röntgenanalyse (EDS). Sie diente der Überprüfung der Zusammensetzungen, d.h. der atomaren Verhältnisse der Metalle, die mit dem Beschichtungsparameter bestimmt wurden (*Bild 31*). In *Tabelle 5* sind diese Daten für die untersuchten beschichteten Hartmetall-Wendeschneidplatten angegeben.

Außerdem wurde die Untersuchung der Einflüsse der Abscheidungsbedingungen auf die Phasenzusammensetzung und auf das Verhältnis Ti/Al abgeschlossen. Diese Untersuchungen wurden auch mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass der Aluminium-Anteil in den TiAlN-Schichten (und damit die Härte der Beschichtungen) sich mittels des Stroms der Titan-Kathode zwischen 22..54% variieren lässt (*Bild 30*).

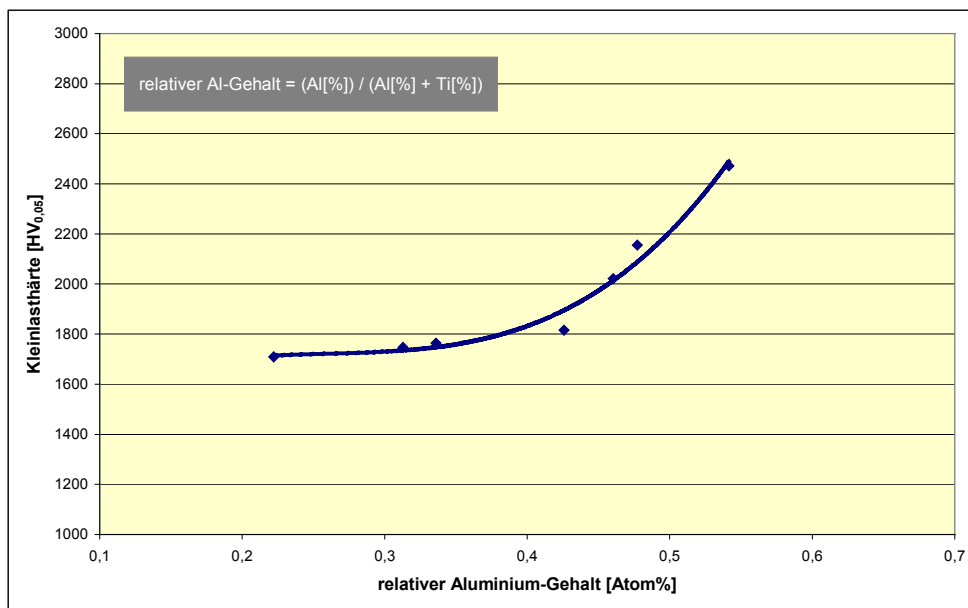
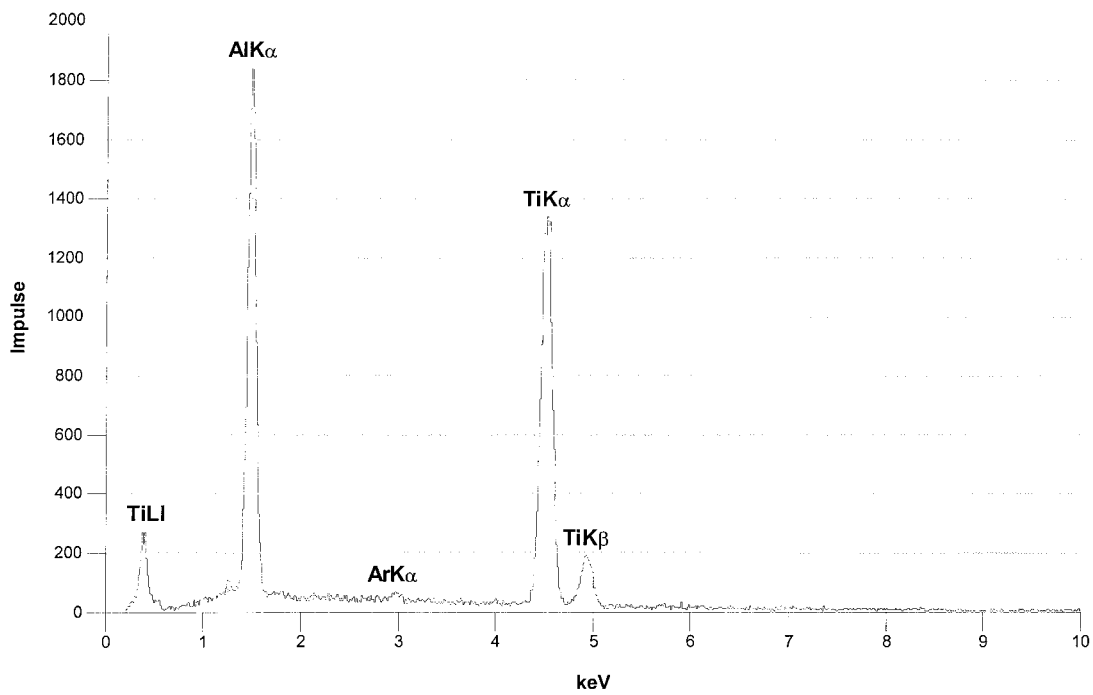


Bild 30: Abhängigkeit der Kleinlast-Vickershärte vom Titan-Gehalt in der TiAlN-Schicht



Ergebnisse der quantitativen Analyse - Standardlose Analyse :

EDS Parameter - 15kV, Abnahmewinkel: 35.0°, Fit Index: 76.63  
 Korrektur: ZAF, Iterationen: 3

Element	Atom-%	Formel	Masse-%	Fehler(±)	Norm%
Al.	42.33	Al	29.29	0.32	29.29
Ar	0.61	Ar	0.62	0.17	0.62
Ti	57.06	Ti	70.09	1.33	70.09
<Gesamt>	100.00		100.00		100.00

Bild 31: Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Mikrosonden-Röntgenanalyse für die Probe Nr. 113



Tabelle 5: Atomare Verhältnisse der Metalle in verschiedenen TiAlN-Schichten, abgeschieden auf Hartmetall-Wendeschnidplatten

Probenbezeichnung	Strom der Titan-Kathode, A	Titangehalt, Atom%	Aluminiumgehalt, Atom%
143	45	44,32	52,34
123	50	51,46	46,98
163	55	53,12	45,32
113	65	57,06	42,33
133	80	65,57	33,19
153	100	67,89	30,93
173	130	76,91	21,96

#### 4.4.2 Oberflächenmorphologie

Es wurden Untersuchungen der Oberflächenmorphologie von beschichteten Hartmetall-Wendeschnidplatten an einem Rasterelektronenmikroskop DSM 950 der Firma ZEISS und an einem optischen Mikroskop der Firma Micro Materials Ltd durchgeführt.

Die mit dem optischen Mikroskop erfasste Oberflächenmorphologie von beschichteten Proben ist in *Bild 32 - Bild 34* dargestellt.

Die mittels Rasterelektronenmikroskopie aufgenommene Oberflächenmorphologie von ausgewählten Proben ist in *Bild 35* veranschaulicht.

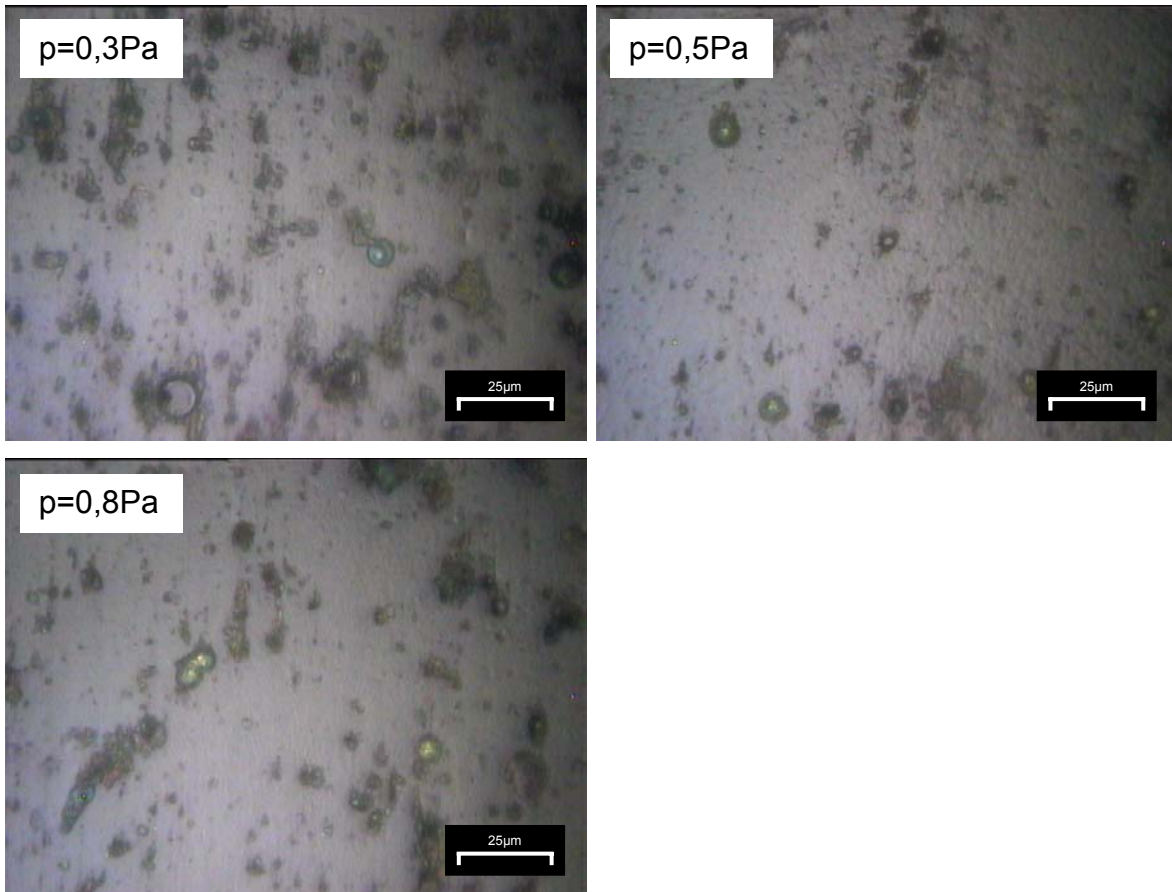


Bild 32: Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie vom Druck in der Vakuumkammer

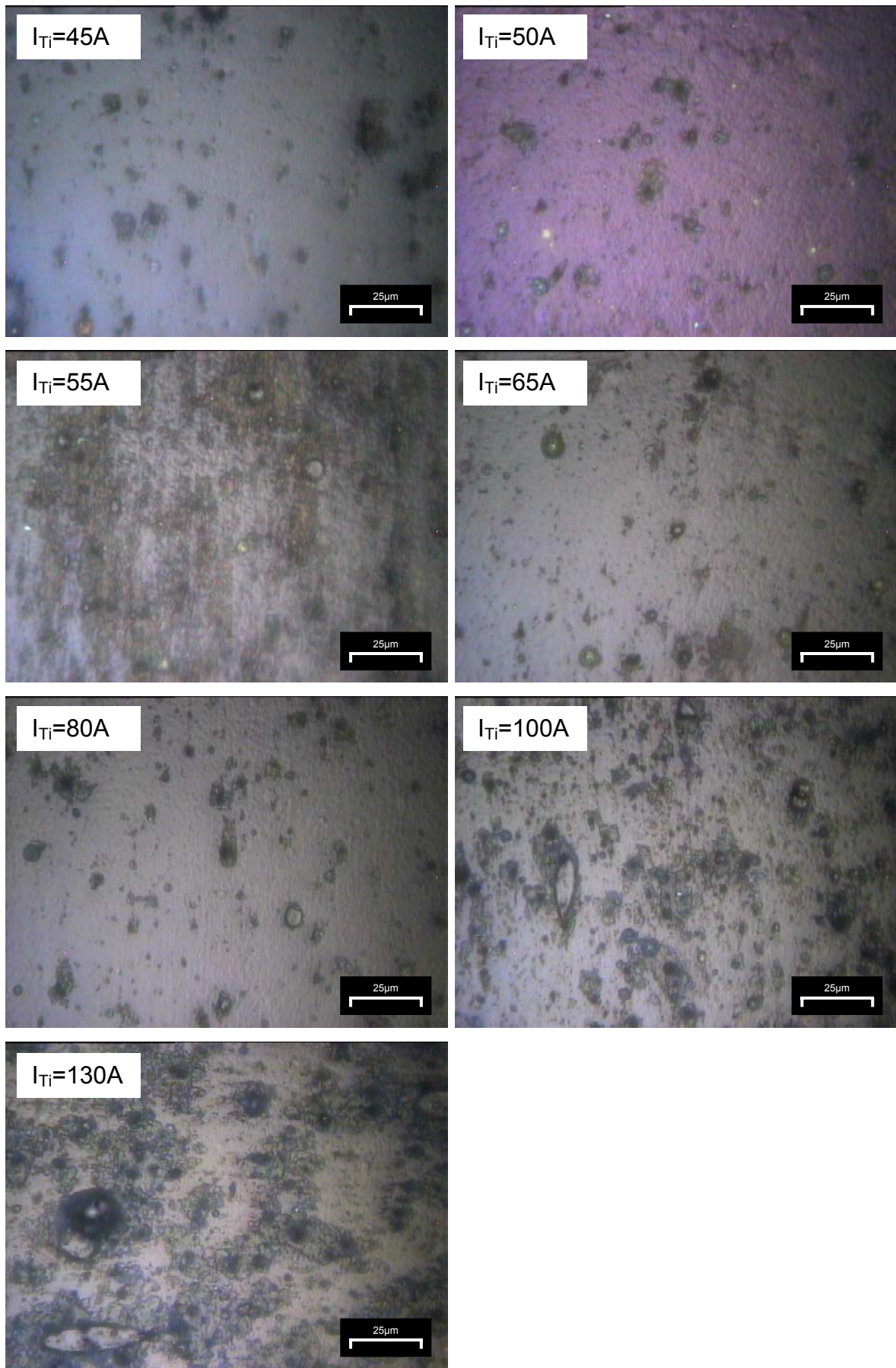


Bild 33: Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie vom Strom der Titan-Kathode

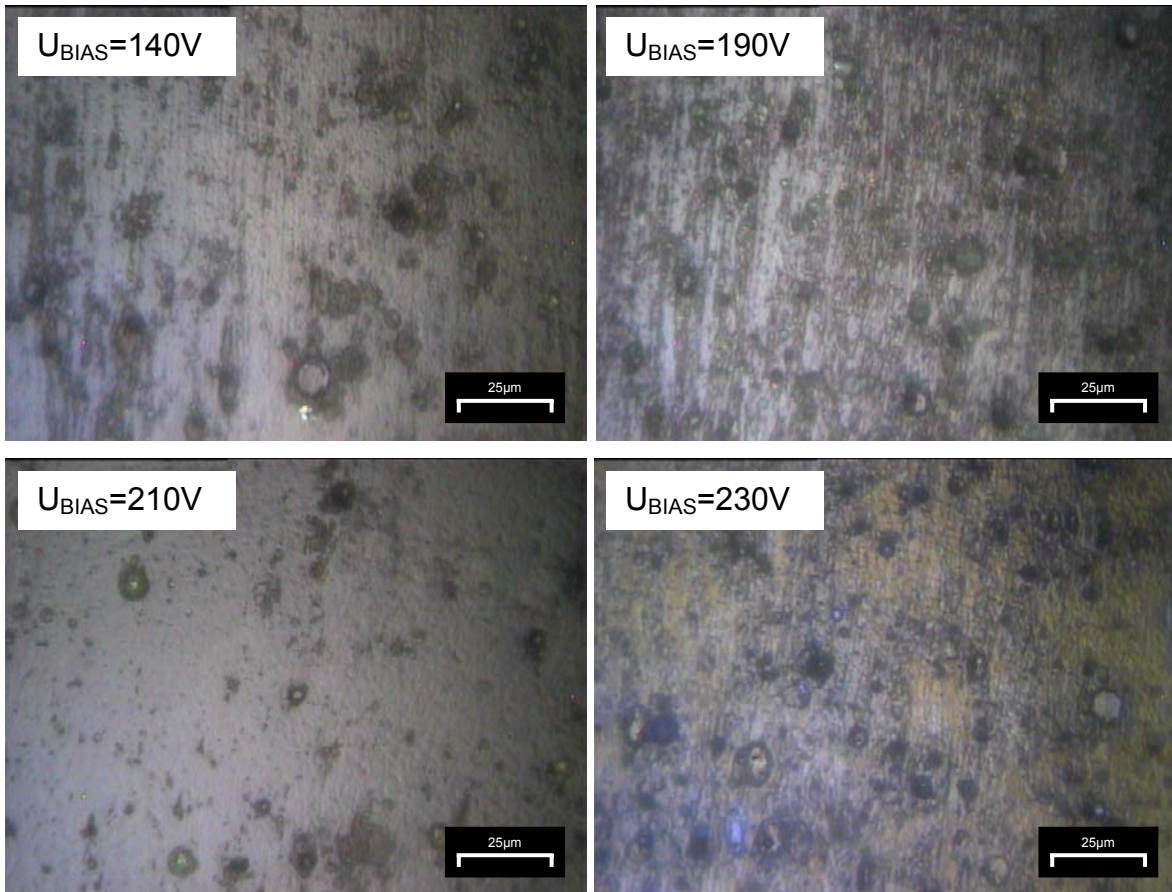


Bild 34: Abhängigkeit der Oberflächenmorphologie von der BIAS-Spannung

Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass die Oberflächenmorphologie der hergestellten Beschichtungen von den Abscheidungsbedingungen bzw. -parametern abhängig ist. Die größte Einwirkung auf die Oberflächenmorphologie der Beschichtungen hatte der Strom der Titan-Kathode. Je größer der Strom ist, desto mehr Metalltropfen (Droplets) bzw. Schichtschäden werden auf der Oberfläche der beschichteten Proben gebildet.



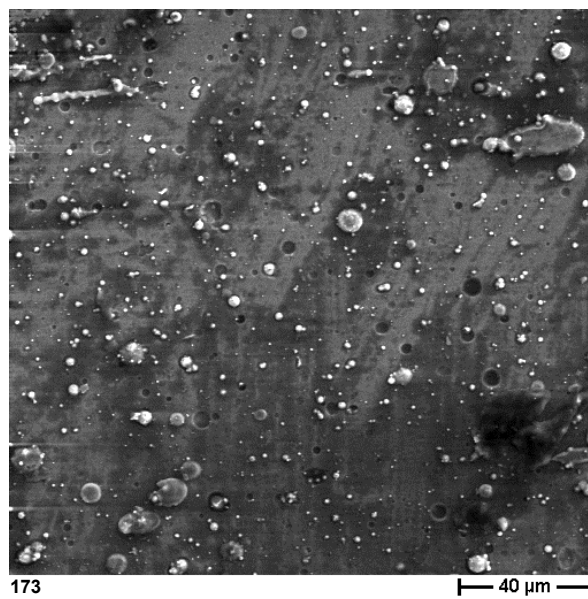
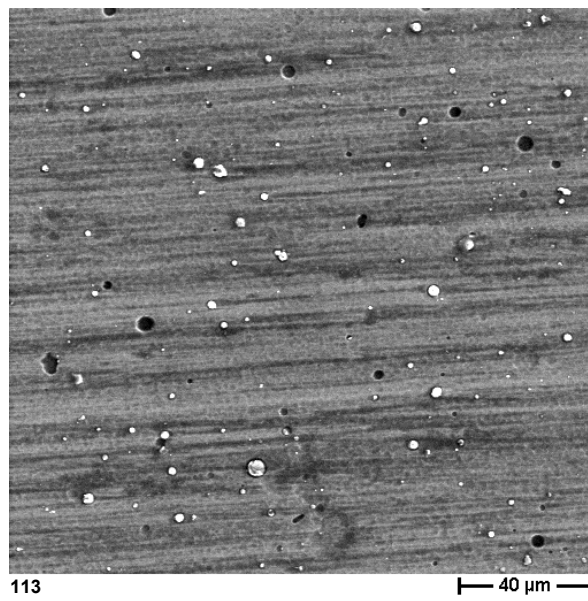
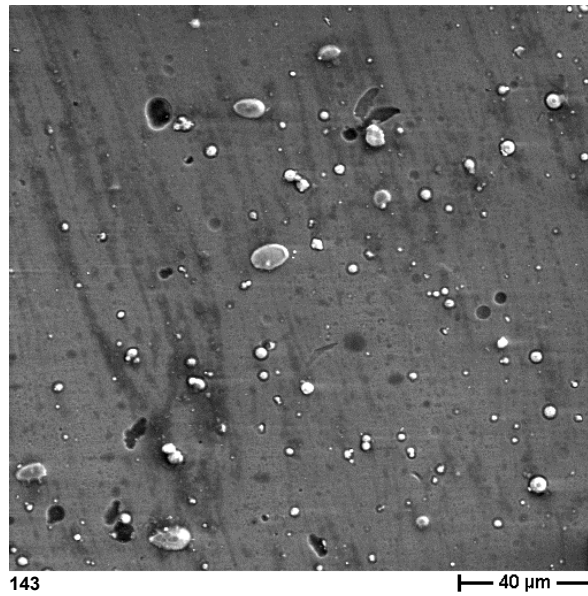


Bild 35: Die Oberflächenmorphologie von ausgewählten Proben (143, 113 und 173)

## 4.5 Technologische Parameter (Analysetechnik und -methoden)

Als wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Zerspanwerkzeuges kann die im Einsatz erreichbare Standzeit (bzw. der davon funktional abhängige Standweg) angesehen werden. Das ist die Zeit, in der sich das Werkzeug im Eingriff befindet und bis zum Erreichen eines zuvor definierten Verschleißkriteriums Zerspanarbeit leistet. Weiterhin sind noch die erzielbare Fertigungsgenauigkeit sowie die Zerspankraft (bzw. die Schnittkraft  $F_c$  als ihre wesentlichste Komponente) z.B. für die Ermittlung des Leistungsbedarfes der Maschine interessant [1, 4, 79, 80, 81].

### 4.5.1 Werkzeugverschleiß und Standzeit

Während des Zerspanungsvorgangs treten am Schneidteil Verschleißerscheinungen auf, die sich je nach Belastungsart und -dauer unterschiedlich stark ausbilden. *Bild 36* zeigt hauptsächlich am Drehwerkzeug vorkommende Verschleißformen. Der Schneidteil verschleißt auf der Spanfläche und auf der Freifläche; der Oxidationsverschleiß an der Nebenfleifläche hat nur zweitrangige Bedeutung. In der Praxis werden daher in erster Linie der Freiflächenverschleiß und der Kolkverschleiß als Standkriterien herangezogen. Die Messgrößen für den Freiflächenverschleiß sind schematisch in *Bild 36* dargestellt.

Die Standzeit von Zerspanwerkzeugen wird in Verschleißversuchen unter konstanten Schnittbedingungen beispielsweise mittels Messung der Verschleißmarkenbreiten auf der Werkzeugfreifläche vorgenommen. Die Verschleißmessung erfolgt in definierten zeitlichen Abständen z.B. unter einem Messmikroskop (hier: Werkzeugmikroskop mit digitalen Mikrometer-Messeinrichtungen, Typ 176-940D der Firma Mitutoyo Corporation), wobei als massgebliche Parameter der Schneidenverschleiß  $VB_1$  (Mittelwert), der Eckenverschleiß  $VB_E$  und der maximale Verschleiß  $VB_{max}$  bestimmt werden (*Bild 36*).

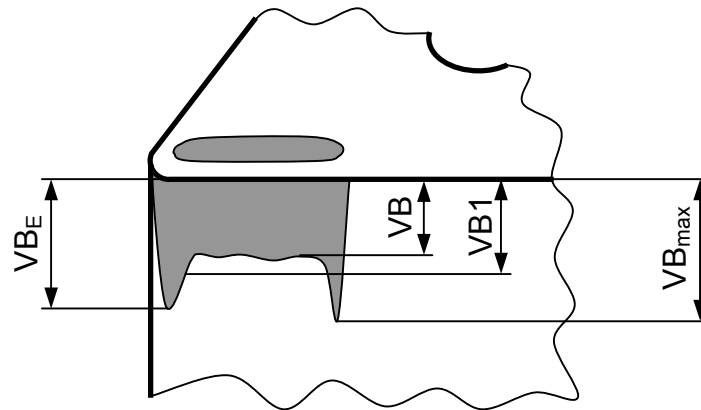


Bild 36: Verschleißmessgrößen an der Freifläche des Schneidkeils

#### 4.5.2 Zerspankraft

Die Zerspankraft beim Drehen lässt sich in einem rechtwinkligen Koordinatensystem in ihre Komponenten zerlegen: die Schnittkraft  $F_c$ , die Vorschubkraft  $F_f$  und die Passivkraft  $F_p$ , (Bild 37). Damit lassen sich die entsprechenden Kräfte und Leistungen unmittelbar den Bauteilen und Antrieben der Maschine zuordnen.

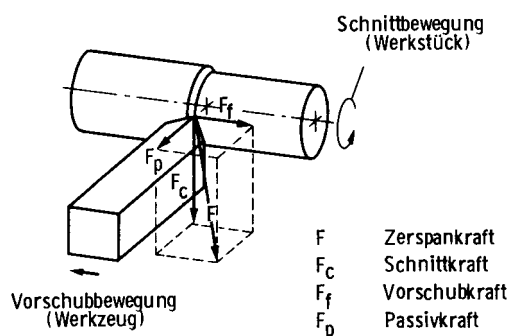


Bild 37: Zerspankraft und ihre Komponenten beim Drehen

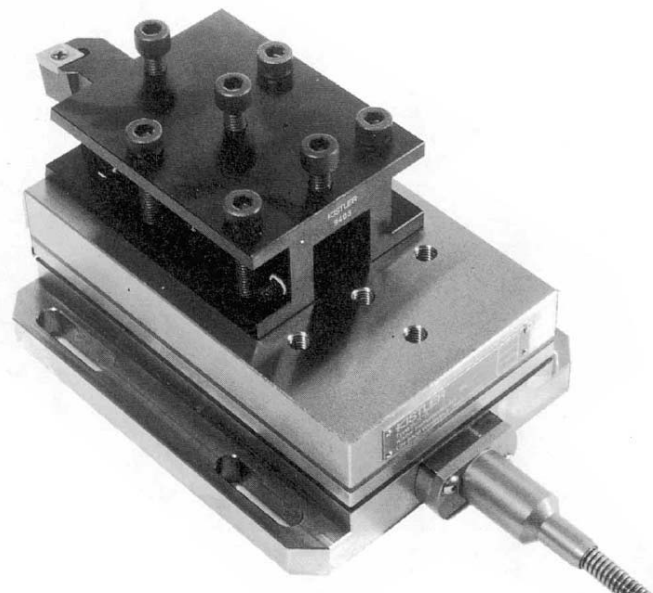


Bild 38: 3-Komponenten-Kraftmessplattform mit Werkzeughalter (Quelle: Kistler Instrumente AG)

Die Messung der im Spanungsprozess auftretenden Kräfte erfolgt mit Hilfe von Ein- oder Mehrkomponenten-Kraftmessplattformen (hier: 3-Komponenten-Dynamometer Typ 9257A der Firma Kistler Instrumente AG (*Bild 38*) und Selbstschreibgerät Metrowatt-Servogor 124 der Firma ABB (Asea Brown Boveri). Dabei werden die auf das Werkzeug bzw. Werkstück wirkenden Kräfte durch piezo-elektrische Messelemente erfasst und zur Auswertung bereitgestellt (siehe *Bild 39*).

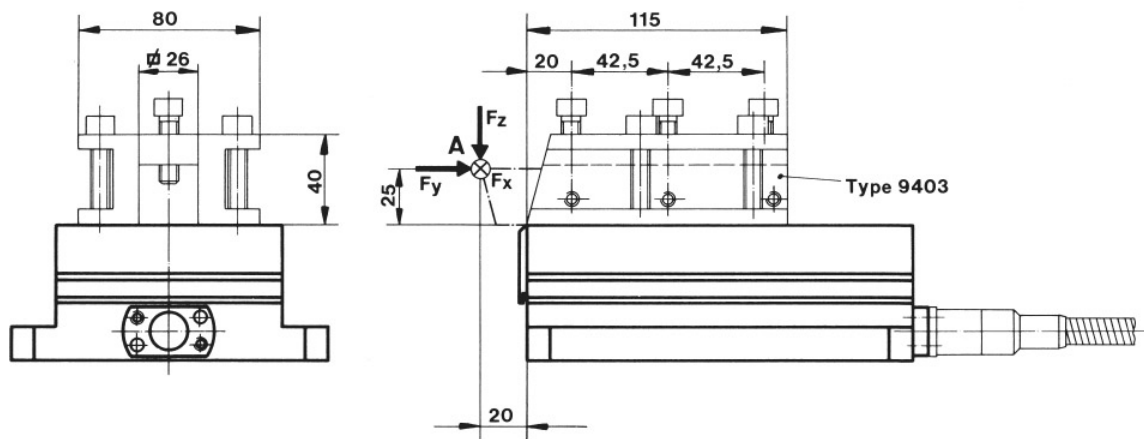


Bild 39: 3-Komponenten-Kraftmessplattform für das Drehen mit Abmessungen  
(Quelle: Kistler Instrumente AG)

### 4.5.3 Oberflächenrauheit des erzeugten Werkstücks

Als Einflussgrößen auf die Oberflächengüte seien zunächst Schnittbedingungen und Schneidteilgeometrie genannt. Die Faktoren, die die Oberfläche im wesentlichen beeinflussen, sind [80]:

- kinematische Rauheit
  - Relativbewegung der Schneidkante (Vorschub, Schnittgeschwindigkeit);
  - Profil der Schneidkante.
- Schnittflächenrauheit
  - Verformungs- und Trennmechanismen an der Schneidkante;
  - Aufbauschneide;
  - Veränderung der Schnittfläche bzw. Ecken- und Freiflächenverschleiß.



- weitere Einflüsse
  - Schwingungen;
  - das Werkstück berührende Späne.

Der Werkzeugverschleiß hat einen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächengüte der Werkstücke. Hauptsächlich verantwortlich für die Ausbildung der Oberfläche beim Drehen ist der Verschleißzustand der Nebenfleißfläche und des Eckenradius [80].

Zur Prüfung der erzielten Fertigungsgenauigkeit lassen sich die Oberflächenrauheit der Werkstücke mit einem geeigneten Tastschnittverfahren (hier: Hommel-Tester T1000 der Firma Hommelwerke GmbH) ermitteln (*Bild 40*). Die zu ermittelnden Rauheitsgrößen sind in *Bild 41* dargestellt.

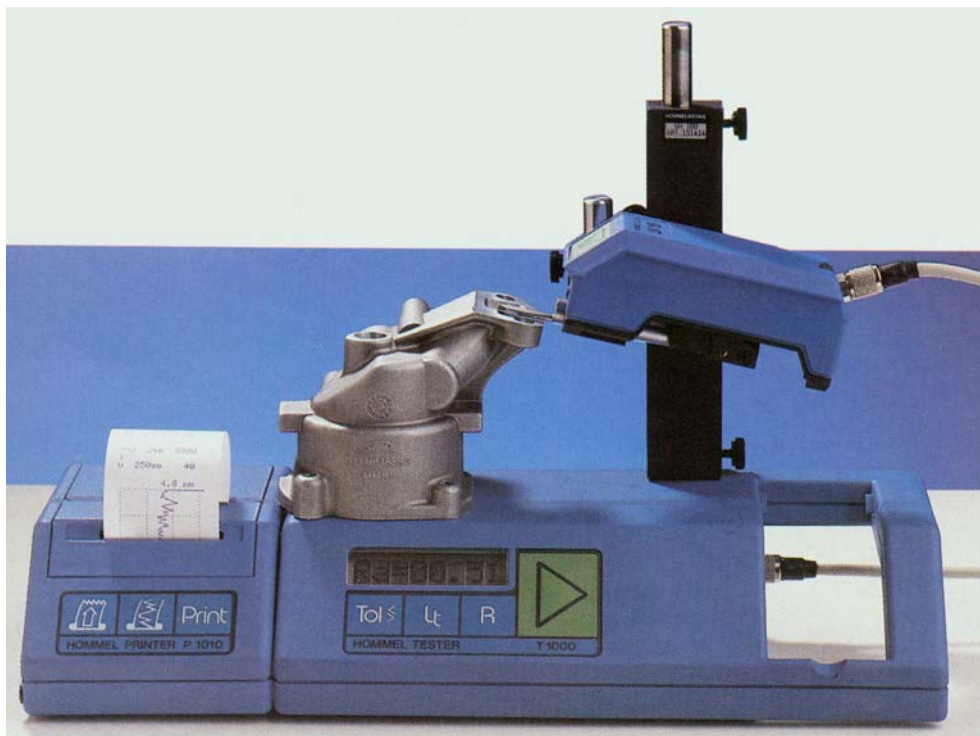


Bild 40: Hommel-Tester T1000 mit dem Druckermodul (Quelle: Hommelwerke GmbH)

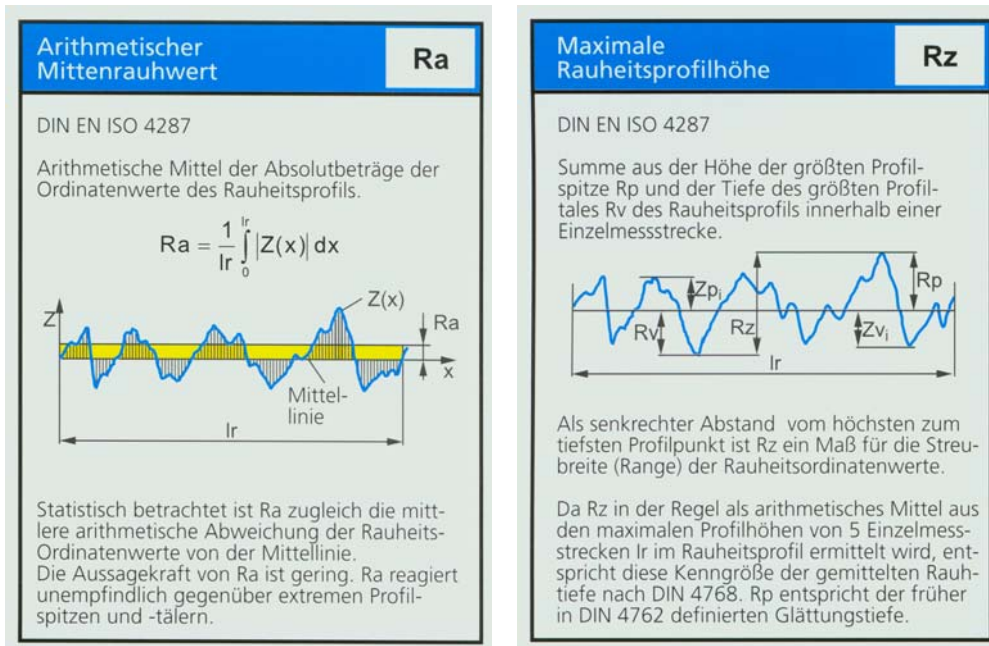


Bild 41: Definition des arithmetischen Mittenrauhwertes R<sub>a</sub> und der maximalen Rauheitsprofilhöhe R<sub>z</sub> nach DIN EN ISO 4287 (Quelle: Hommelwerke GmbH)

## **5 UNTERSUCHUNG DER LEISTUNGSFÄHIGKEIT BESCHICHTETER ZESPANWERKZEUGE BEIM DREHEN**

Anhand von praktischen Versuchen soll die Leistungsfähigkeit von TiAlN-Werkzeugbeschichtungen nachgewiesen werden, die mit der kombinierten Plasmabehandlungs- und -beschichtungstechnologie behandelt wurden. Zu diesem Zweck wurden auf Hartmetall-Wendeschneidplatten verschiedene TiAlN-Beschichtungen aufgebracht, deren Eigenschaften unter Anwendung der bereits dargestellten Mess- und Prüfverfahren untersucht wurden. Zum Vergleich wurden konventionell hergestellte unbeschichtete Referenzplatten herangezogen. Das Hauptinteresse der Untersuchungen galt dem Verschleiß-Standzeit-Verhalten der Werkzeuge im praxistypischen Einsatz sowie der Beurteilung eigenschaftsbestimmender Schichtparameter.

Das in der Fertigung von Maschinenbauteilen universell und vielfach eingesetzte Verfahren *Drehen* gestattet eine unkomplizierte Versuchsdurchführung bei hoher Praxisrelevanz und geringen Werkzeugkosten. Die Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen erfolgt anhand von Diagrammen, um Korrelationen zwischen verschiedenen Parametern deutlich werden zu lassen. Dabei wurde sehr oft die Standzeit als wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der ermittelten Werte herangezogen.

### **5.1 Gerätetechnische und technologische Vorbereitung der Zerspantests**

Es wurden Versuchsstände für das zumeist auf einer CNC-Schrägbett-drehmaschine M160 U-2 der Firma MAGDEBURG Werkzeugmaschinen AG aufgebaut, die für die Durchführung der geplanten Versuche in diesem Forschungsvorhaben geeignet sind. Diese normierten Versuchsstände mit vereinheitlichten Versuchsvorschriften und Betriebsparametern sind mit moderner Mess- und Rechentechnik ausgerüstet.

Die Verschleißmessungen an den getesteten Werkzeugen wurden manuell dokumentiert und rechnergestützt ausgewertet und protokolliert. Die Datenerfassung, -protokollierung und -auswertung erfolgte bei allen Qualitätsmessungen ebenfalls per Rechner.

## 5.2 Drehen mit beschichteten Hartmetallwendeschneidplatten

### 5.2.1 Versuchsplanung und -durchführung

Die experimentellen Untersuchungen zum Drehen wurden am Beispiel Außenlängsdrehen durchgeführt. Es wurden handelsübliche Standard-Wendeschneidplatten aus Hartmetall mit den folgenden Parametern verwendet:

Schneidstoff:	Hartmetall TTM (unbeschichtet);
Verwendungsgruppe:	P25;
Geometrie:	SNMG 120408;
Firma:	Krupp-Widia, BRD.

Diese wurden an der Anlage NNV 6.6-I5 unter Anwendung der kombinierten Plasmabehandlungs- und -beschichtungstechnologie mit unterschiedlichen TiAlN-Schichten versehen. Zum Leistungsvergleich wurden unbeschichtete Wendeschneidplatten des gleichen Typs und des gleichen Herstellers eingesetzt.

Bei allen im Rahmen der Promotionarbeit durchgeführten Drehversuchen wurde mit einem Klemmhalter KT 5B WIDAX des Typs PSSNR2525M12 und oben genannten Wendeschneidplatten mit einem Werkzeug-Einstellwinkel  $\kappa_r = 45^\circ$  gearbeitet.

Für alle Versuche wurde Rundmaterial aus dem Werkstoff C45 (HB 180 - 200) mit dem Durchmesser  $\varnothing=200$  mm verwendet. Bei den Versuchen wurden

- die auftretenden Zerspankräfte,
- der Werkzeugverschleiß (Standzeit des Werkzeugs),
- die Qualität der hergestellten Oberflächen des Werkstücks (Rauheit)

nach oben genannten Methoden ermittelt, protokolliert und aus- bzw. bewertet.

Bei den Drehversuchen wurden folgende Schnittwerte realisiert:

- Schnittgeschwindigkeit:  $v_c = 250 \text{ m/min} - 350 \text{ m/min}$
- Vorschub:  $f = 0,2 \text{ mm/U}$
- Schnitttiefe:  $a_p = 1 \text{ mm}$
- Schnittbedingung: Trockenbearbeitung.

Als Verschleißkriterium für das Drehen wurde der Freiflächenverschleiß durch die Messgrößen mittlere Verschleißmarkenbreite  $VB_1$  der Hauptschneide und der Eckenverschleißmarkenbreite  $VB_E$  erfaßt. Die zulässigen Größen dieser Verschleißmarkenbreiten zur Kennzeichnung des Erreichens der Werkzeugstandzeit wurden festgelegt mit:

- $VB_{zul.} = 0,2 \text{ mm}$ ,
- $VB_{E, zul.} = 0,4 \text{ mm}$ .

## 5.2.2 Versuchsergebnisse und Auswertung

### 5.2.2.1 Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten

Auf der Basis zahlreicher Zerspanversuche wurden die Einflüsse der unterschiedlichen TiAlN-Beschichtungen auf die Schneideigenschaften und Schneidparameter ermittelt. Die Abhängigkeiten des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens von den Beschichtungsparametern sind in *Bild 42 - Bild 45* für das Drehen dargestellt.

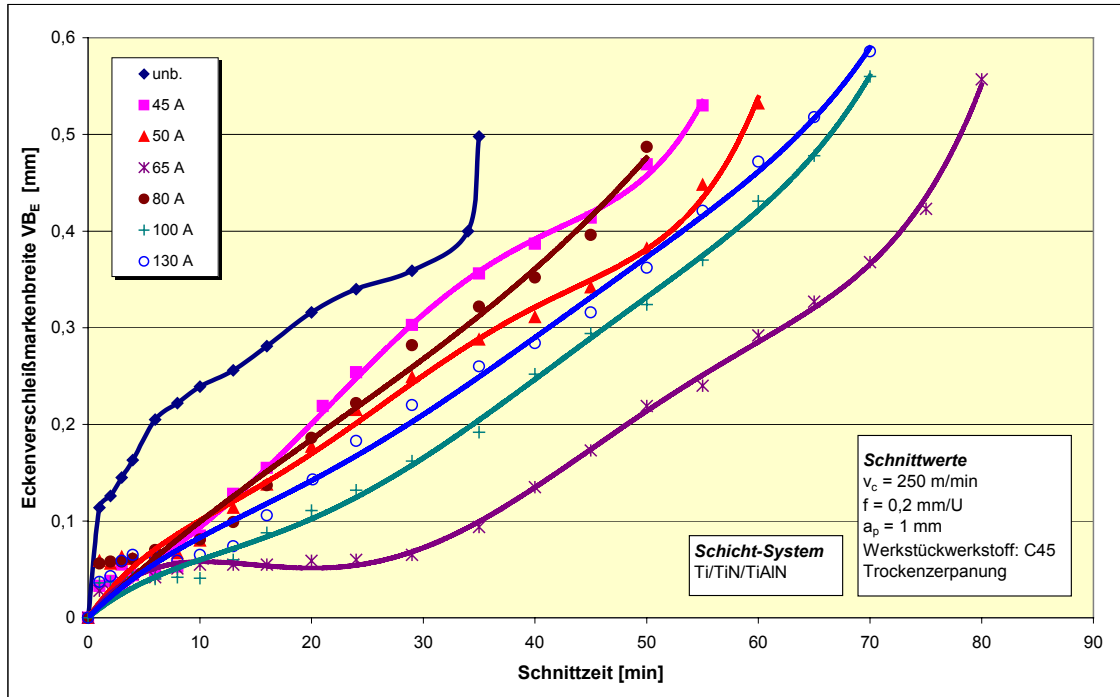


Bild 42: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens vom Strom der Titan-Kathode

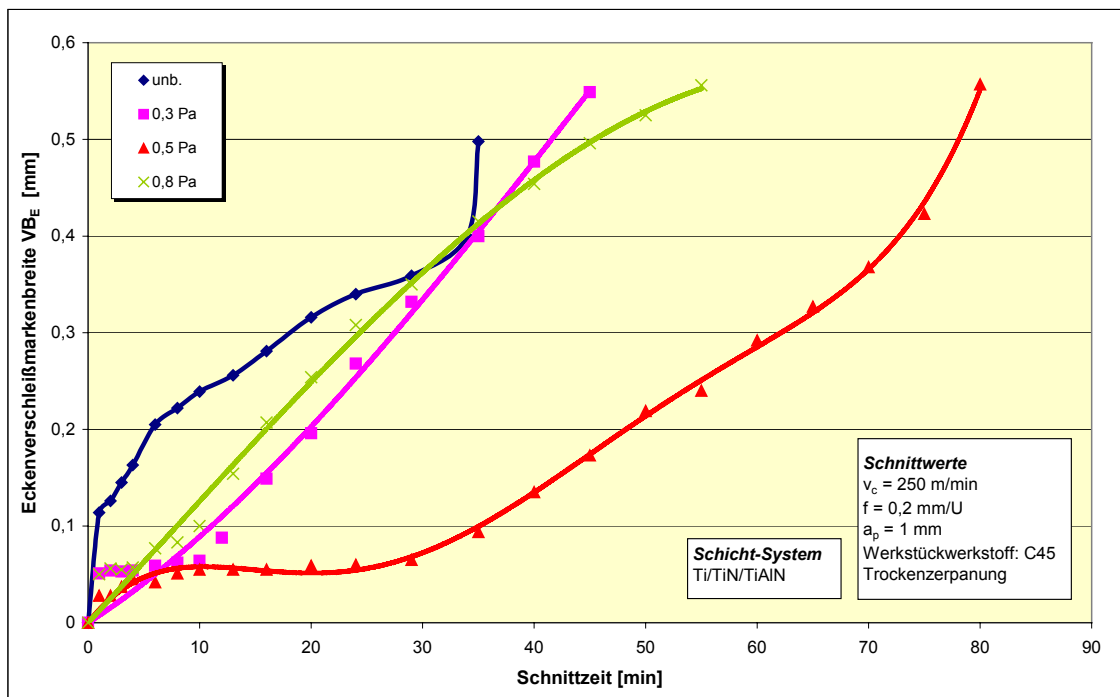


Bild 43: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens vom Druck in der Vakuumkammer

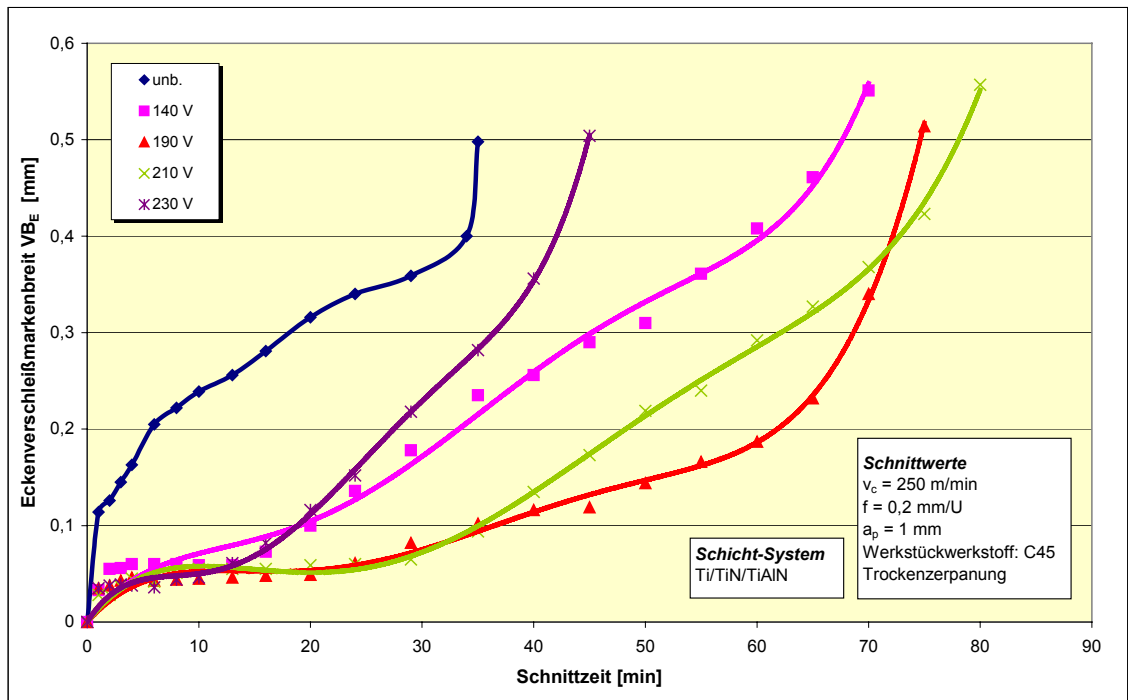


Bild 44: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens von der BIAS-Spannung

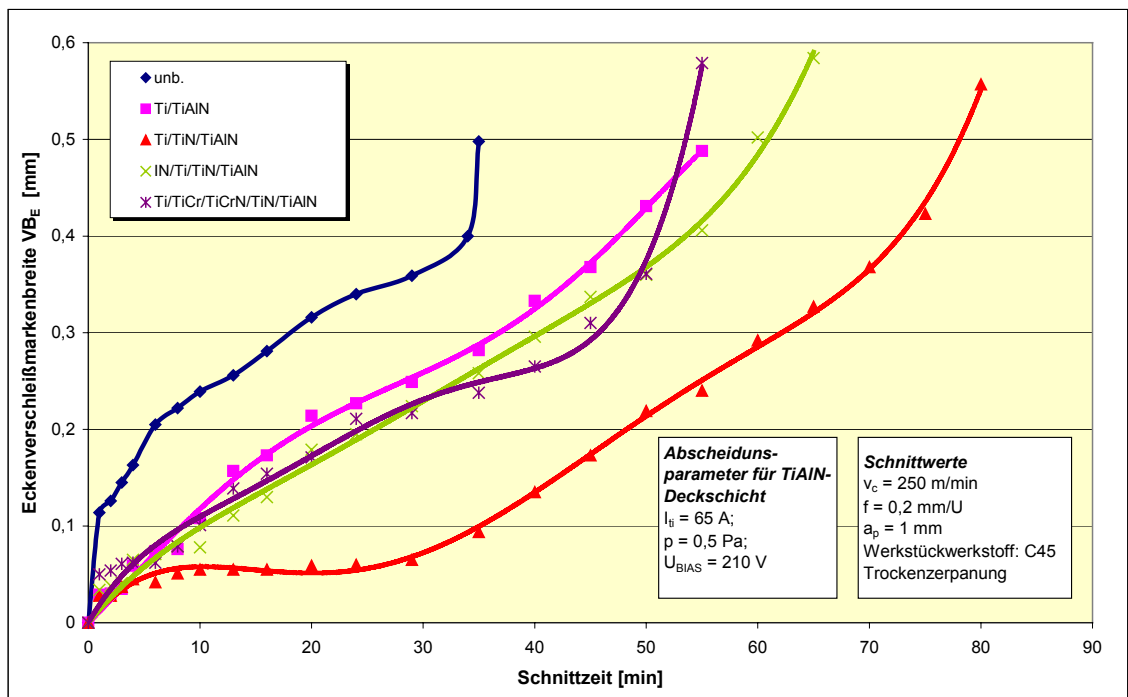


Bild 45: Abhängigkeit des Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens vom Schichtaufbau

Das ermittelte Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten für die Hartmetallwendeschnidplatten mit verschiedenen Varianten der TiAlN-Beschichtungen zeigt charakteristische Kurven-Verläufe in Abhängigkeit von den Abscheidungsparametern. Die Beschichtung verringert die Verschleißintensität (Verschleißgeschwindigkeit) beim vorläufigen (Phase des Einarbeitens) und normalen (Beharrungsphase) Verschleiß, reduziert die Einarbeitungszeit des Werkzeuges. Ein weiteres Merkmal des ermittelten Verschleiß-Schnittzeit-Verhaltens besteht darin, dass der katastrophale Verschleiß der beschichteten Wendeschnidplatten bei bedeutend kleineren Höchstwerten des Verschleißes (besonders für die Verschleißmarkenbreite VB1) auftritt, was mit dem Erkenntnisstand korrespondiert.

#### 5.2.2.2 Standzeit-Verhalten

Die Ergebnisse zeigen eine Standzeitsteigerung der beschichteten Platten um das 2..3 fache im Vergleich zu den unbeschichteten Referenzplatten (siehe *Bild 46 - Bild 48*). Die besten Standzeitergebnisse zeigten die Wendeschnidplatten mit der Probenbezeichnung 113, gekennzeichnet durch die Beschichtungsparameter:  $I_{Ti} = 65 \text{ A}$ ;  $p = 0,5 \text{ Pa}$ ;  $U_{BIAS} = 210 \text{ V}$ . Beachtenswert dabei war, dass diese Proben nicht die größte Härte aufwiesen (vgl. *Bild 20 - Bild 22*).

Das *Bild 46* dokumentiert die Abhängigkeit der Standzeit der mit TiAlN beschichteten Hartmetallwendeschnidplatten vom Strom der Titan-Kathode. Es ist zu sehen, dass der Kathodenstrom während der Schichtabscheidung einen bedeutenden Einfluss auf die Standzeit des beschichteten Werkzeuges ausübt, der damit verbunden ist, dass bei der Zunahme des Stromes der Titan-Kathode (beim konstanten Strom der Aluminium-Kathode) der Titan-Gehalt in der TiAlN-Schicht auch zunimmt (vgl. *Bild 30* und *Tabelle 5*), was zur Reduzierung der Schichthärte (vgl. *Bild 20*) und folglich zur Reduzierung der Verschleißfestigkeit des Werkzeuges führt.



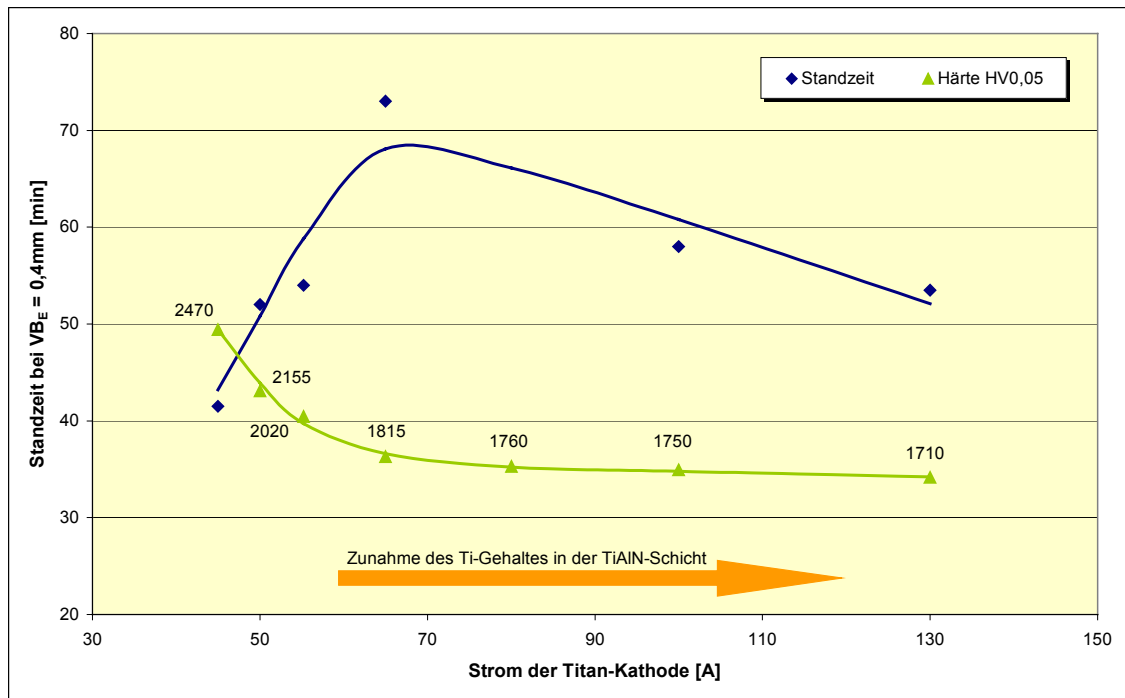


Bild 46: Abhängigkeit der Standzeit vom Strom der Titan-Kathode für das Ti/TiN/TiAlN-System

Bei einem kleinen Strom der Titan-Kathode nimmt der Aluminium-Gehalt in der TiAlN-Schicht zu. Dabei werden viele Ionen und sehr wenige neutrale Partikel gebildet, denn die Partikel werden vom Separator eingefangen bzw. gefiltert. Diese Ionen fliegen ungebremst zum Substrat, wodurch eine sehr verspannte Schicht abgeschieden wird. Dadurch werden eine Steigerung der Schichthärte und gleichzeitig eine Zunahme der Sprödigkeit bzw. Abnahme der Zähigkeit verursacht. Dies führt zur vorzeitigen Zerstörung der Schicht beim Spanen durch einen kohäsiven Verschleiß und als deren Folge zur Reduzierung der Standzeit des Werkzeuges.

Bei dem Strom der Titan-Kathode von 65 A verfügt die TiAlN-Schicht über die optimale Kombination der Härte und der Zähigkeit für die eingesetzten bzw. getesteten Zerspanbedingungen. Solche Schichten widerstehen dem Verschleißangriff gut, was die Zerspantestergebnisse beweisen. Der optimale Strom der Titan-Kathode ändert sich mit der Veränderung der Zerspanbedingungen [95] und des Zerspanverfahrens bzw. der Beschichtungsanlage [82, 83].

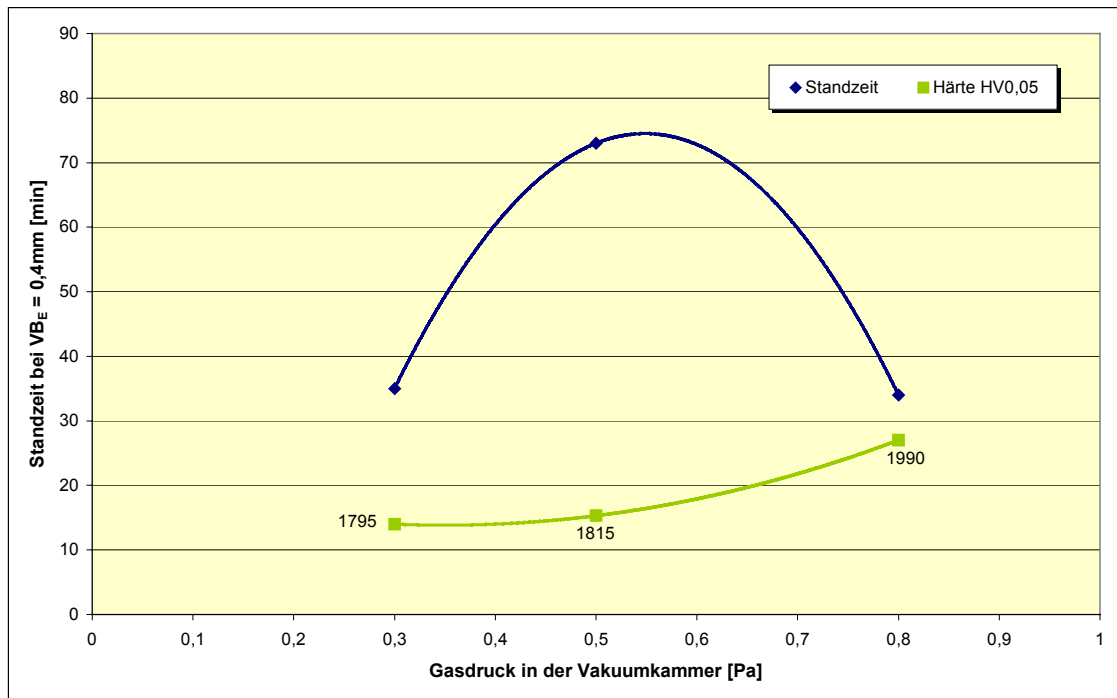


Bild 47: Abhängigkeit der Standzeit vom Druck in der Vakuumkammer für das Ti/TiN/TiAlN-System

Im *Bild 47* ist veranschaulicht, dass der Gasdruck in der Vakuumkammer während der Schichtabscheidung ebenfalls einen starken Einfluss auf die Standzeit des beschichteten Werkzeuges mit einem ausgeprägten Standzeit-Maximum leistet. Dieser Verlauf erklärt sich damit, dass die TiAlN-Schicht mit zunehmendem Druck eine hohe Härte (vgl. *Bild 21*) und eine erweiterte Breite der Diffraktionsmaxima (<333>-Textur), die die Mikroentstellungen des Kristallgitters charakterisieren, erfährt. Diese Entstellungen werden mit der Einführung der Atome in das Kristallgitter des Stickstoffes, das den grösseren Durchmesser, vergleichsweise zum Durchmesser der sich in einem entsprechenden Abstand des Titan-Subgitters einpassenden Inosphäre haben, erklärt. Die hohe Härte und das hohe Niveau der Mikroentstellungen des Kristallgitters führen zur Zunahme der Sprödigkeit der Beschichtung und zur Senkung ihrer Widerstandsfähigkeit gegen Mikro- und Makrobrüche beim Spanen. Das verursacht eine Absenkung der Standzeit [95].

Im Bereich niedrigen Gasdrucks verringert sich die Härte der TiAlN-Beschichtung, die Struktur der Schicht wird unterstöchiometrisch bzw. enthält viel Metallbindungen, d.h. neben den Nitriden im Gefüge der TiAlN-Schicht befinden sich noch  $\alpha$ -Ti und freies (ungebundenes) Aluminium, dessen Vorhandensein zur

heftigen Vergrößerung der Neigung zur Haftung zwischen der Schicht und dem Werkstückwerkstoff beiträgt. Dies führt zum adhäsiven Verschleiß der Schicht beim Spanen und als Folge zur Reduzierung der Standzeit des Werkzeuges, was die Untersuchungen gezeigt haben.

Bei einem Gasdruck von 0,5 Pa weist die TiAlN-Schicht eine Textur, ähnlich der <111>-Textur, mit einem niedrigen Niveau der Mikroentstellungen des Kristallgitters auf, wobei ganze Titan- und Aluminiumatome in das Nitrid gebunden sind. Solche Schichten widerstehen dem Verschleißangriff ausgezeichnet. Der optimale Gasdruck in der Vakuumkammer während der Schichtabscheidung hängt sehr stark vom Typ der PVD-Beschichtungsanlage und besonders von der Bauart des Verdampfers ab [82, 83, 95].

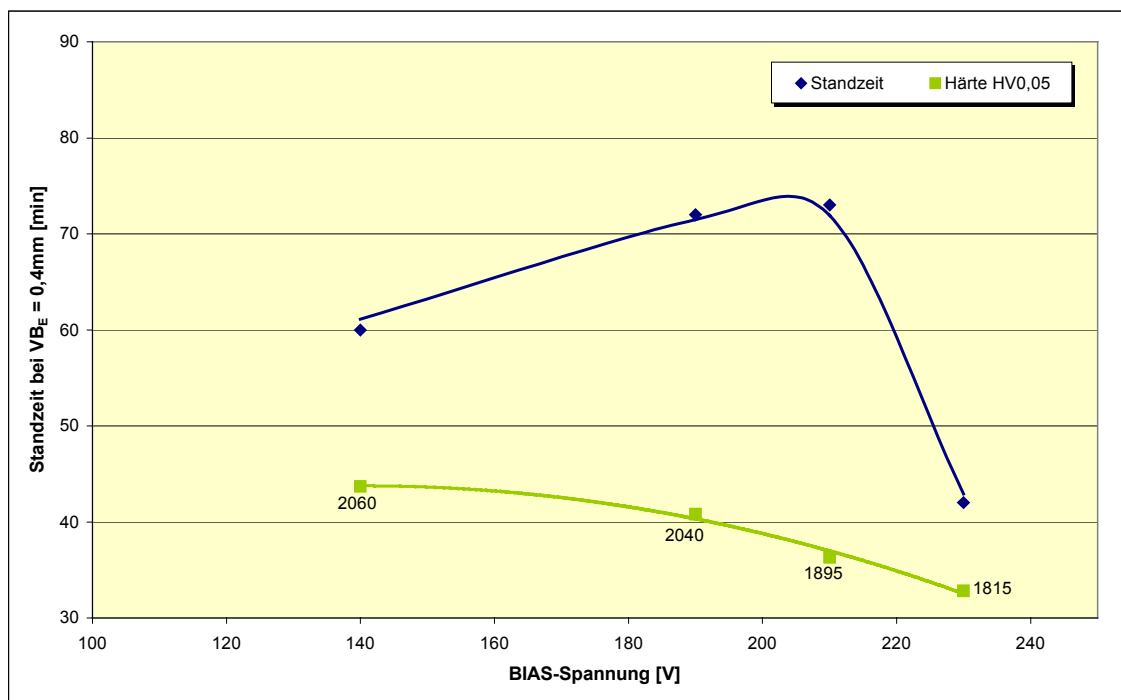


Bild 48: Abhängigkeit der Standzeit von der BIAS-Spannung für das Ti/TiN/TiAlN-System

Das *Bild 48* zeigt schließlich die starke Abhängigkeit der Standzeit der mit TiAlN versehenen Hartmetallwendeschnidplatten von der BIAS-Spannung während des Beschichtungsvorganges. Bei einer hohen BIAS-Spannung erfahren die Ionen, die zum Substrat fliegen, eine große Beschleunigung. Dabei werden die schweren

Ionen (z.B.: Titan mit einer Atommasse 48) stärker als leichte Ionen (z.B.: Aluminium und Stickstoff mit einer Atommasse 27 bzw. 14) beschleunigt. Die leichten Ionen werden mit den schweren, stark beschleunigten Ionen weggesputtert (sog. Rücksputtereffekt [84]). Das führt zur Entstehung stickstoff- bzw. aluminiumarmer, dünner und poröser Schichten mit kleiner Härte. Solche Schichten neigen zum adhäsiven Verschleiß. Das hat einen negativen Einfluss auf die Standzeit des Werkzeuges.

Bei einer kleinen BIAS-Spannung dagegen werden die Ionen nur gering beschleunigt. Aus diesem Grunde wird die Schicht dick, stickstoff- bzw. aluminiumreich, hart und deswegen extrem spröde (vgl. *Bild 22*). Solche Beschichtungen widerstehen dem Verschleißangriff nur ungenügend.

Bei BIAS-Spannungen von 190..210 V erhalten die Ionen eine ausreichende Beschleunigung. Bei solchen Spannungen bilden sich dichte und gleichzeitig defektfreie Schichten, die nur gering verschleifen.

### 5.2.2.3 Kraft-Verhalten

Während der experimentellen Untersuchungen mit den beschichteten Wendeschneidplatten wurden die drei Zerspankraftkomponenten Schnittkraft  $F_c$ , Vorschubkraft  $F_f$  und Passivkraft  $F_p$  aufgenommen.

Die größte Abhängigkeit vom jeweiligen Beschichtungstyp zeigte die Schnittkraftkomponente. Die Abhängigkeit der Schnittkraft von den Beschichtungsparametern bzw. vom Schichtaufbau für den Zeitpunkt  $t = 0$  min (scharfes Werkzeug) ist in *Bild 49* - *Bild 51* veranschaulicht. Die beiden anderen Zerspankraftkomponenten (Vorschubkraft  $F_f$  bzw. Passivkraft  $F_p$ ) zeigen qualitativ die gleichen Kurvenverläufe, bewegen sich aber im Vergleich zur Schnittkraft in einem niedrigeren Kräftebereich.

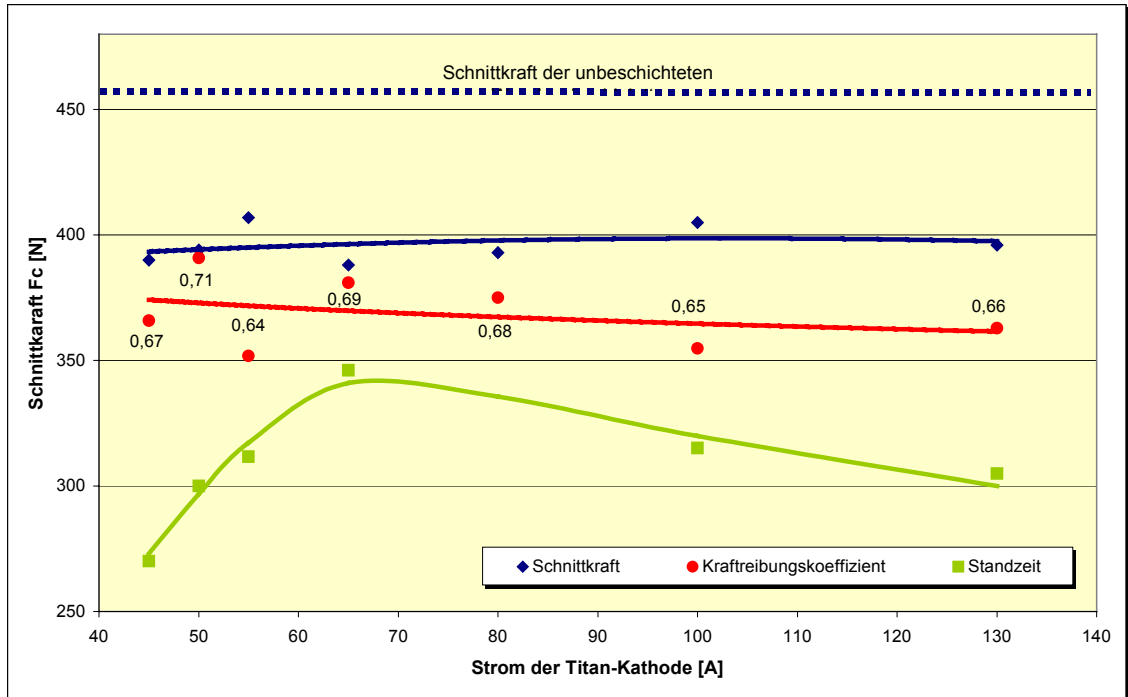


Bild 49: Abhängigkeit der Schnittkraft vom Strom der Titan-Kathode

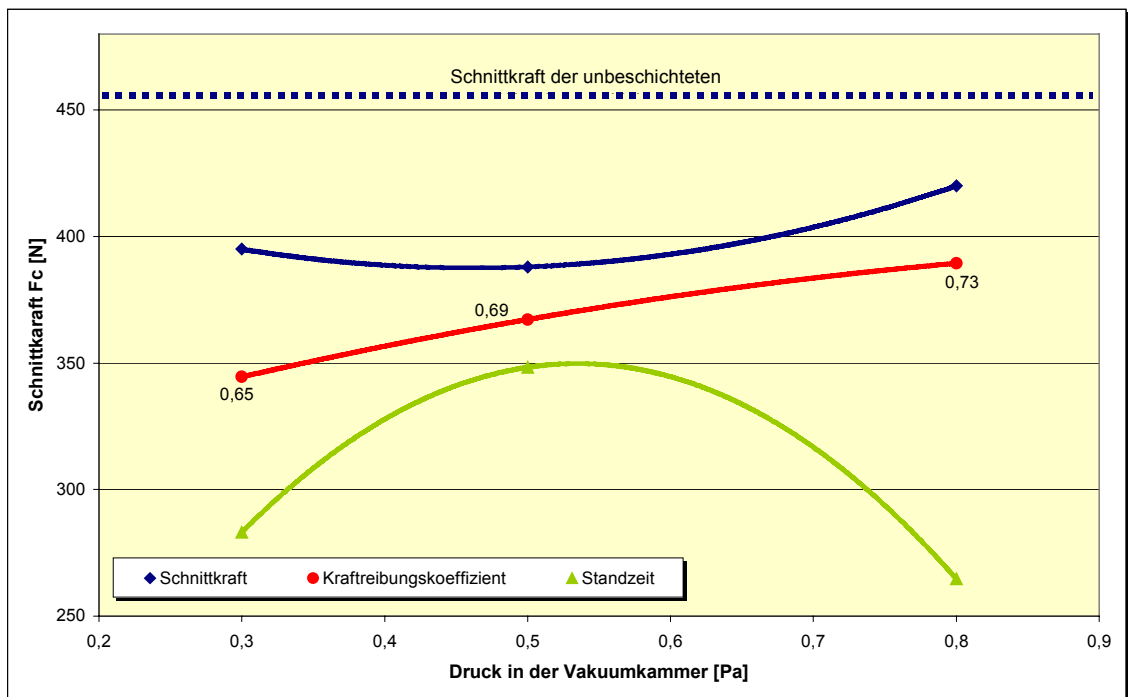


Bild 50: Abhängigkeit der Schnittkraft vom Druck in der Vakuummkammer

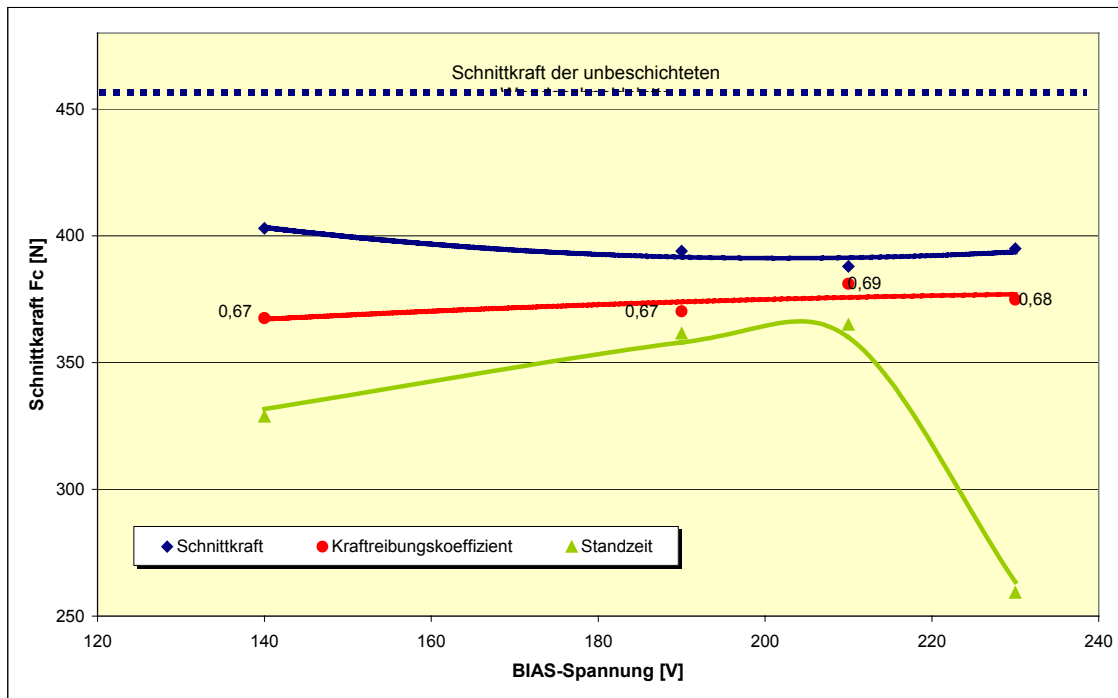


Bild 51: Abhängigkeit der Schnittkraft von der BIAS-Spannung

Diese Kraft-Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die Schnittkraft bei den beschichteten Wendeschneidplatten um bis zu 17 % im Vergleich zu den unbeschichteten Referenzplatten reduziert. Dabei übt der Gasdruck in der Vakuumkammer den größten Einfluss auf die Schnittkraft aus. Alle anderen Abscheidungsparameter (Kathodenstrom und BIAS-Spannung) sowie der Schichtaufbau bewirken nur geringe Schnittkraft-Unterschiede.

Die ermittelten Schnittkräfte korrelieren sehr stark mit den Standzeiten. Dabei weist die Beschichtung mit der größten Standzeit die geringste Schnittkraft auf.

Die Reduzierung der Zerspankräfte kann dadurch erklärt werden, dass die Nitride der schwerschmelzbaren Metalle der IV. bis VI. Gruppen des periodischen Systems der chemischen Elemente nur sehr enge Gebiete der Homogenität aufweisen, was ihre Heterophasen-Struktur bedingt. Diese Verbindungen werden durch eine niedrige Neigung der Haftung mit den Konstruktionsstählen und von einer hohen thermodynamischen Stabilität charakterisiert. Solche Schichten verkleinern beim Spanen bedeutend den Umfang der Kontaktdeformationen mit dem Span und die Zone der Spanbildung. Ebenso verringert sich beim Zerspanvorgang mit beschichteten Werkzeugen die Kontaktlänge des Spanes mit

der Spanfläche des Werkzeuges (siehe *Bild 52*). Es sinkt der Reibungskoeffizient sowohl auf der Spanfläche als auch auf der Freifläche, was zur Reduzierung der Zerspankräfte führt. [95]

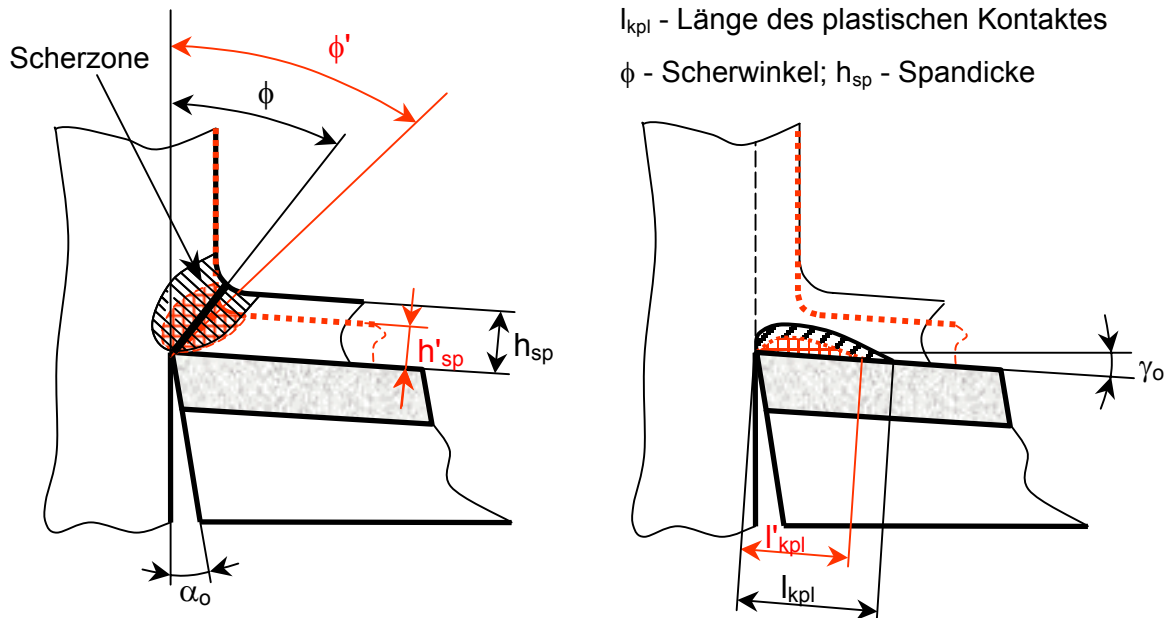


Bild 52: Änderung der Scherzone bzw. der Kontaktlänge des Spanes mit der Spanfläche des Werkzeuges infolge des Spanens mit beschichtetem Werkzeug (gestrichelte Linien und Bezeichnungen mit Strichen beziehen sich auf das beschichtete Werkzeug)

Es kann angenommen werden, dass die Beschichtungsparameter nicht nur die Schichthärte und -zähigkeit, sondern auch die Kontaktbedingungen beim Spanen, insbesondere den Reibungskoeffizienten der Reibpaarung "Werkzeug-Werkstück", beeinflussen. Für die quantitative Einschätzung dieses Einflusses wird ein Kraftreibungskoeffizient nach der Formel bestimmt

$$\mu_F = \frac{F_R}{F_C} \quad (2)$$

wobei gilt:  $F_R$  - Reibungskraft [N];  $F_C$  - Schnittkraft [N].

Die Reibungskraft beim Spanen mit einem Meißel, der einen Werkzeug-Einstellwinkel  $\kappa_f = 45^\circ$  hat, wird mit der Gleichung  $F_R = |\vec{F}_f + \vec{F}_p|$  berechnet. Dabei gilt:  $F_f$  - Vorschubkraft [N];  $F_p$  - Passivkraft [N].

Diese Berechnungen haben gezeigt, dass die unbeschichtete Referenzplatte erwartungsgemäß den größten Kraftreibungskoeffizienten in Höhe von 0,75 aufweist, der sich um ca. 5..15 % größer im Vergleich zu den beschichteten Wendeschneidplatten einstellt. Dabei übt der Gasdruck in der Vakuumkammer den größten Einfluß auf den Kraftreibungskoeffizienten aus. Das erklärt eine große Abhängigkeit der Zerspankräfte vom Gasdruck während der Schichtabscheidung. Die Verläufe des Kraftreibungskoeffizienten sind in *Bild 49 - Bild 51* veranschaulicht.

Der große Einfluss des Gasdrucks in der Vakuumkammer auf den Kraftreibungskoeffizienten und auf die Schnittkraft beim Spanen erklärt sich damit, dass sich bei einem hohen Druck die TiAlN-Schicht sehr porös, rau und mit einem großen Gasgehalt versehen darstellt. Das verursacht die Schnittkraftsteigerung. Mit der Verringerung des Gasdrucks wird die Schicht dichter und glatter, was die Senkung des Kraftreibungskoeffizienten bzw. der Schnittkraft bewirkt. Alle anderen Abscheidungsparameter (Kathodenstrom und BIAS-Spannung) sowie der Schichtaufbau weisen nur unbedeutende Kraftreibungskoeffizient- bzw. Schnittkraft-Unterschiede (innerhalb einiger Hundertstel bzw. einiger Newton) auf und können deshalb vernachlässigt werden.

Die ermittelten Ergebnisse zeugen von der Möglichkeit der Steuerung der Spanbildungscharakteristiken und der Kontaktbedingungen beim Spanen auch mit Hilfe der Veränderung der Zusammensetzung der Schichten durch eine Variation der Abscheidungsparameter.

#### 5.2.2.4 Rauheits-Verhalten

An den bearbeiteten Werkstücken wurden im Anschluß an die Zerspantests Untersuchungen zur Oberflächengüte vorgenommen. Zu diesem Zweck wurden Messungen der Rauheit der hergestellten Werkstückoberfläche in Vorschubrichtung mit einem entsprechenden Oberflächenprüfgerät durchgeführt. Die Abhängigkeit des Mittenrauhwertes der erzeugten Werkstückoberfläche von der Schnittzeit für ausgewählte Proben, die mit unterschiedlichen Abscheidungsparametern beschichtet wurden bzw. einen unterschiedlichen Schichtaufbau



aufweisen, ist in *Bild 53* dargestellt. Hier ist mit zunehmender Schnittzeit bei allen Proben eine Erhöhung der erzeugten Oberflächenrauheit zu verzeichnen.

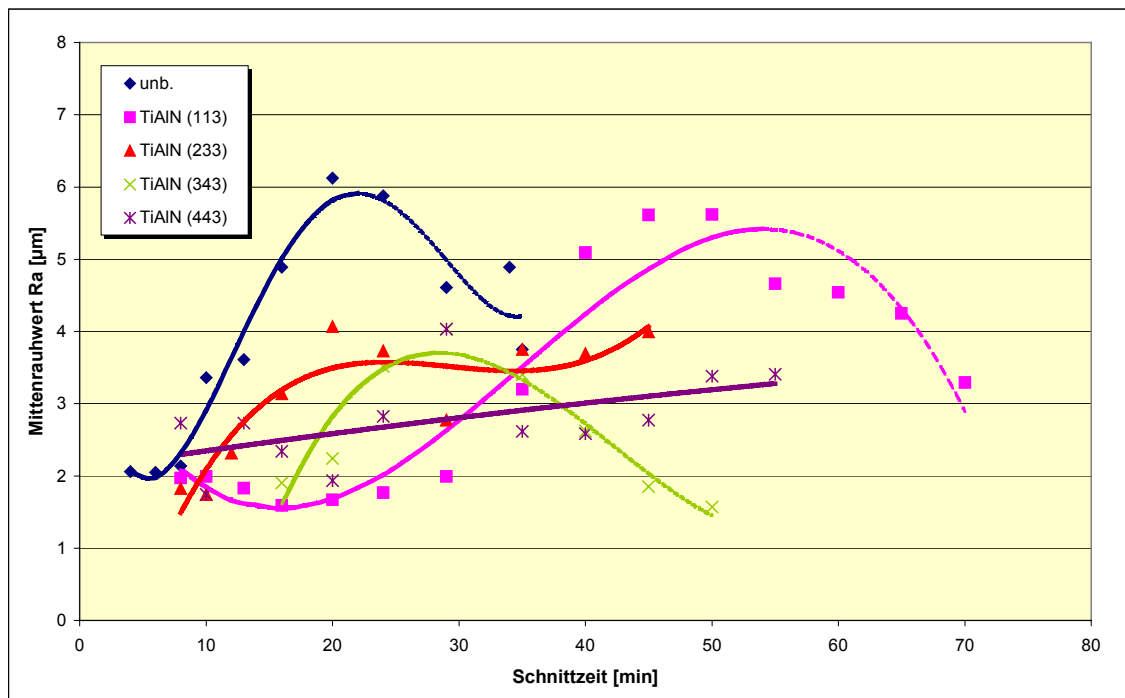


Bild 53: Zeitlicher Verlauf des Mittentrauhwertes der hergestellten Werkstückoberfläche für ausgewählte Proben

Am Anfang des Drehprozesses wurden die höchsten Mittentrauhwerte an den Werkstückoberflächen nachgewiesen, die mit unbeschichteten Wendeschneidplatten erzeugt wurden. Als Ursache für die höhere Oberflächengüte beim Einsatz der mit TiAlN-beschichteten Wendeschneidplatten kommen im wesentlichen die günstigen tribologischen Schicht- und Zerspaneigenschaften dieses leistungsfähigsten Beschichtungstyps infrage. Das lässt den Schluß zu, dass die Abscheidungsparameter einen erheblichen Einfluss auf die technologischen Ergebnis-Parameter, wie z.B. die Werkstück-Oberflächenrauheit, haben können. Dies findet Bestätigung bei der Beurteilung des im *Bild 53* exemplarisch dargestellten Verlaufs der Werkstück-Oberflächenrauheiten.

Die ermittelten, auf dem Werkstück erzeugten Oberflächenrauheiten korrelieren sehr stark mit den Schnittzeiten bzw. mit dem Verschleiß. Dabei folgen größtenteils die Rauheitskurven den Verschleiß-Schnittzeit-Verläufen. Für alle Proben wächst die Werkstück-Oberflächenrauheit mit der Zunahme der Schnittzeit

(ununterbrochene Linie des Diagramms im *Bild 53*). Für einige Platten weist der Verlauf des Mittenrauhwertes ein Maximum und die Verringerung der Rauheit am Ende der Standzeit (gestrichelte Linie des Diagramms im *Bild 53*) auf. Ein solcher Verlauf kann damit erklärt werden, dass sich während der Verschleiß-Ausbildung auf der Schneidecke der Wendeschneidplatte, der ursprünglich mit einem Radius versehen war, eine Facette bzw. Fase bildet. Diese Fase glättet Unebenheiten, die sich beim Spanen bilden; die Unebenheiten werden quasi plastisch umgeformt. Dadurch verringert sich die tatsächliche Rauheit der bearbeiteten Oberfläche.

Für die Ermittlung der Standzeit, die für praktische Zwecke experimentell erfolgte, ist die Darstellung ihrer Abhängigkeit von den Einflussgrößen in Diagrammform gebräuchlich. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  beeinflusst die Standzeit  $T$  am stärksten. Die Abhängigkeit der Standzeit von der Schnittgeschwindigkeit wird in Standzeitkurven veranschaulicht, die analytisch durch eine Potenzfunktion angenähert werden. Es wird die doppeltlogarithmische Darstellung bevorzugt, da sich in diesem Fall der Kurvenverlauf im Definitionsbereich als Gerade (Standzeitgerade) darstellen lässt. [85, 86]

Das Standzeitdiagramm wird zweckmäßig aus einem Verschleiß-Zeit-Diagramm entwickelt. Dazu ist es erforderlich, den standzeitbestimmenden zulässigen Verschleiß (hier:  $VB_{zul.}$  bzw.  $VB_{E. zul.}$ ) in Abhängigkeit von der Zeit bei bestimmten Spanungsbedingungen zu ermitteln und konstant zu setzen.

Es wurden die Standzeitdiagramme für einige ausgewählte Versuchsproben entwickelt (siehe *Bild 54*). Dafür wurden folgende Wendeschneidplatten herangezogen:

1. unbeschichtete Referenzplatte;
2. TiAlN-beschichtete Wendeschneidplatte, die die besten Ergebnisse gezeigt hat (Probenbezeichnung 113).

Alle anderen Schnittparameter (Vorschub, Schnitttiefe), ausgenommen die Schnittgeschwindigkeit, waren konstant (siehe Abschnitt 5.2.1). Die Schnittgeschwindigkeit wurde zwischen 250 und 350 m/min variiert.

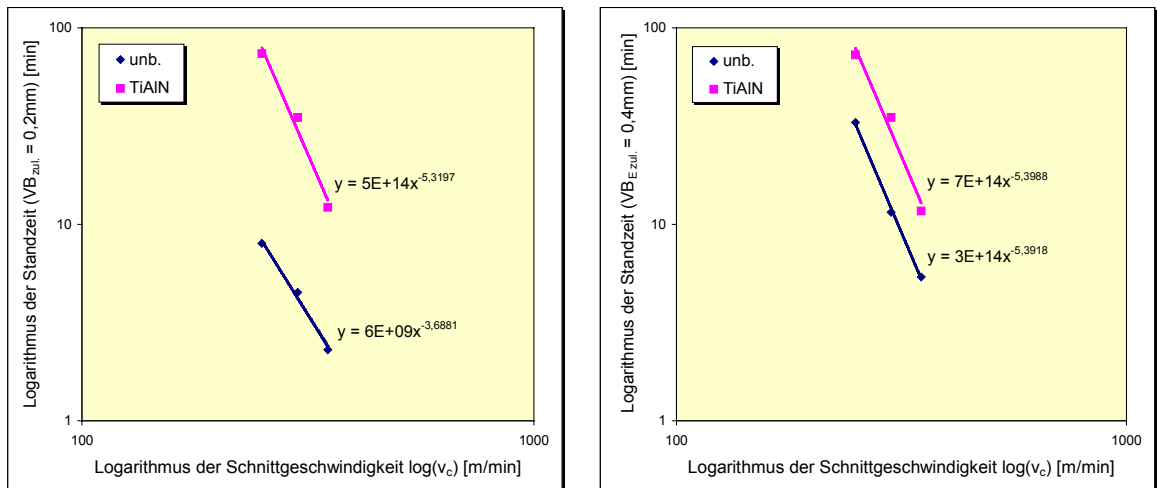


Bild 54: Standzeitdiagramme für ausgewählte Versuchsproben

Aus den entwickelten Standzeitdiagrammen geht hervor, dass mit wachsender Schnittgeschwindigkeit die Standzeit stark abfällt. Dabei weist die TiAlN-beschichtete Probe bei gleich bleibender Schnittgeschwindigkeit die längere Standzeit bzw. bei gleicher Standzeit die höhere Schnittgeschwindigkeit (um 20..40 % höher) im Vergleich zur unbeschichteten Referenzprobe auf, was mit dem Erkenntnisstand korrespondiert.

## 5.3 Empirisches Modell

### 5.3.1 Optimierungskriterien des Zerspanungs- bzw. Beschichtungsprozesses

Die Anwendung der Zerspanwerkzeuge mit einem Verschleißschutzkomplex erlaubt, auf Grund der Erhöhung des Verschleißwiderstandes nicht nur den Werkzeugverschleiß zu verringern, sondern auch die Wärme aus der Zerspanzone besser abzuleiten. Infolgedessen erreicht die Temperatur ihren extremen Wert für die behandelten Werkzeuge erst bei höheren Schnittgeschwindigkeiten, was zur Verschiebung des Wertes der konstanten Verschleißgeschwindigkeit (Verschleißintensität) in die Bereiche der größeren Schnittgeschwindigkeiten führt.

Die Effektivität der Zerspanung wurde an Hand der Leistungsfähigkeit des Werkzeuges bewertet. Unter der Leistungsfähigkeit des Werkzeuges ist im betreffenden Fall die Gesamtfläche der mit dieser Werkzeugschneide bearbeiteten Oberfläche bis zum Auswechseln der Schneide (Standzeitende) zu verstehen:  $\text{Fläche} = 10^{-6} \pi D f n t \text{ [m}^2\text{]}$ .

Die maximale Effektivität der Zerspanung kann bei optimalen Schnittwerten  $f_o$ ,  $n_o$ ,  $t_o$  erreicht werden. Beliebige Änderungen des Vorschubes, der Drehzahl und der Schnittzeit bis zur Auswechslung der Schneide führen entweder zu verringerter Effektivität des behandelten Werkzeuges oder zum schnelleren katastrophalen Verschleiß des Werkzeuges. Der Zielfunktionswert (Effektivität der Zerspanung) bei den optimalen Schnittwerten ist stets das Maximum, das bei der Verwendung des Werkzeuges nach dem Kriterium 2. Art erreicht werden kann.

Als Effektivitätskriterium (Kriterium 2. Art) kann angenommen werden:

- die Zerspanungsproduktivität, das heißt das Spannungsvolumen pro Zeiteinheit;
- die bearbeitete Fläche des Werkstückes pro Zeiteinheit;
- das Werkstoffvolumen bis zur Auswechslung der Werkzeug-Schneide;
- die gesamte bearbeitete Fläche des Werkstückes bis zur Auswechslung der Schneide (Standzeit).

### 5.3.2 Auswahl des mathematischen Modells

Der im System "Werkstück - Werkzeug" ablaufende Zerspanungsprozess unterliegt Einwirkungen sowohl von bestimmten als auch von zufälligen Faktoren der Zerspanung. Ist mindestens ein Faktor zufällig, dann sind die seinen Zustand charakterisierenden Parameter der Zerspanung auch zufällig und der Zerspanungsprozess muß mit zufälligen Funktionen dargestellt werden. Da sich die Zerspanung unter dem Einfluss einer großen Anzahl unkontrollierbarer zufälliger Faktoren befindet, ist eine Berücksichtigung von allen Faktoren in einem mathematischen Modell praktisch unmöglich. Da ein Einfluss von unkontrollierbaren zufälligen Faktoren auf die Zerspanungsparameter besteht, müssen stochastische Modelle zur Anwendung gelangen. Das mathematische Modell

beinhaltet die Darstellung der Zusammenhänge zwischen Parametern und Faktoren des im Steuerungsobjekt ablaufenden Prozesses. Das Modell soll über eine ausreichende Präzision verfügen und für ein ganzes Steuerungsgebiet gültig sein.

Die Verwendung der stochastischen Modelle, die den zufälligen Zerspanungscharakter berücksichtigen, verlangt eine unter den Bedingungen der automatisierten Fertigung sehr aktuelle, der Erhöhung der Zuverlässigkeit dienende Zerspanungsprozesssteuerung, für deren Lösung stochastische mathematische Modelle benutzt werden. Also stellt sich im Wesentlichen die Frage nach der Verteilungsdarstellung von zufälligen Zerspanungsparametern.

Den Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie liegt die formalisierte Beschreibung der zufälligen Größen zugrunde. Es wird dabei vorausgesetzt, dass der Zerspanungsprozess über die Eigenschaft der statistischen Stabilität verfügt, das heißt, dass seine Charakteristiken, trotz des zufälligen, unvorhersehbaren Charakters der Werte irgendeines Zerspanungsprozessparameters, nicht zufällige Funktionen der Zeit und anderer Faktoren sind.

Das Verteilungsgesetz einer zufälligen Größe, das den Zusammenhang zwischen den möglichen Werten dieser zufälligen Größe und der Wahrscheinlichkeit ihrer Erscheinung festlegt, ist die beste Charakteristik der Größe.

Da die Zerspanung unter dem Einfluss von zufälligen Faktoren erfolgt, kennzeichnen die zufälligen Parameter der Zerspanung ihren Zustand. Das Verteilungsgesetz der zufälligen Zerspanungsparameter kann mit folgender Gleichung beschrieben werden [87, 88]:

$$F(\mathbf{R}) = C \cdot \prod_{j=1}^k Z_j^{A_{Z_j}} \cdot \text{EXP}\left(\sum_{j=1}^k B_{Z_j} \cdot Z_j\right) \quad (3)$$

Dabei gilt:  $R$  - zufälliger funktioneller Prozessparameter,  
 $Z$  - Steuerungsfaktor,  
 $k$  - Anzahl der Steuerungsfaktoren.

Das ausgewählte mathematische Modell soll für die ganze Standzeit des

Werkzeuges gültig sein. Aufgrund dessen soll der Zeitraum der Modellfunktion für die Steuerung des Zerspanungsprozesses als Modellierungsobjekt angenommen werden. Das ist erforderlich, weil die Zerspanung ein dynamischer Prozess ist und seine Parameter sich in Abhängigkeit von der Zeit gesetzmäßig verändern.

### 5.3.3 Modell für das Drehen mit beschichteten Hartmetallwerkzeugen

Der Aufbau des mathematischen Modells für die Zerspanung bzw. Beschichtung ist eine Prozedur der Informationserfassung über die Steuerungseinwirkungen und über den Zustand der Zerspanung. Die Prozedur enthält folgende Etappen:

- Auswahl der Zerspanung bzw. der Beschichtung im Raum und in der Zeit;
- Auswahl der Art der mathematischen Modelle des Prozesses;
- Planung von Experimenten;
- Auswahl der Messmittel und Realisierung des Experimentes;
- Bestimmung der Parameter des mathematischen Modells bei der Bearbeitung der Versuchsergebnisse.

Die Beschichtungssteuerungsfaktoren müssen mit dem Steuerungsbereich übereinstimmen. Nicht nur Steuerungsfaktoren wirken auf den Zerspanungsprozess ein, sondern auch Störfaktoren, daß heißt diejenigen, deren Werte sich außerhalb des Steuerungssystems bilden. Die Störfaktoren sind meistens zufälliger Art. Die Zerspanung kann als ein von zufälligen Parametern bestimmter Prozess betrachtet werden, dessen Zustand mit zufälligen Parametern bewertet wird.

Die Beschreibung des Standzeitverhaltens beim Drehen mit einem beschichteten Werkzeug als ein dynamischer Prozess erfolgt am besten durch eine Funktion folgender Art:

$$T = C \cdot I^{A_I} \cdot p^{A_p} \cdot U^{A_U} \cdot \text{EXP}(B_I \cdot I + B_p \cdot p + B_U \cdot U) \quad (4)$$

wobei gilt: T – Standzeit [min]; I - Strom der Titan-Kathode [A]; p - Gasdruck in der Kammer [Pa]; U - BIAS-Spannung [V]; C, B<sub>j</sub> - Koeffizienten; A<sub>j</sub> - Potenzexponenten.

In dieser Form kann das Modell für die Optimierung des Zerspanungs- bzw. Beschichtungsprozesses nach der Nichtlinearprogrammierungsmethode eingesetzt werden.

Die Information über die Steuerungseinwirkungen wird als ein Plan des Mehrfaktorenexperimentes dargestellt. Der Plan besteht aus einer Gesamtheit von allen möglichen Kombinationen der Beschichtungssteuerungsfaktoren  $I$ ,  $p$  und  $U$ , die gleichzeitig auf zwei oder mehreren Niveaus variiert sind. Die benötigte ausreichende Anzahl von Versuchen für die eindeutige Bewertung von den unbekanntem Modellparametern  $C$ ,  $A_I$ ,  $A_p$ ,  $A_U$ ,  $B_I$ ,  $B_p$  und  $B_U$  mit der notwendigen Präzision hängt von der Anzahl der Steuerungsfaktoren ab.

Der Versuchsplan für die Ermittlung der Modellparameter beim Drehen  $T = f(I, p, U)$  ist in *Bild 55* dargestellt. Dabei werden 3 Abscheidungsparameter (Kathodenstrom  $I$ , Gasdruck  $p$  und BIAS-Spannung  $U$ ) im bestimmten Bereich variiert. Der Schichtaufbau bleibt konstant. Dafür wurde das Schichtsystem ausgewählt, das die besten Standzeitergebnisse geleistet hat, die Ti/TiN/TiAlN-Schicht. Die Information über den Zustand wird als Kombination der Versuchsdaten vorgestellt, die im Laufe des Experimentes ermittelt wurden - Freiflächenverschleiß (VB) bzw. Standzeit (T) des Werkzeuges.

Das Ziel war, solche Werte von  $C$ ,  $A_I$ ,  $A_p$ ,  $A_U$ ,  $B_I$ ,  $B_p$  und  $B_U$  zu bestimmen, bei denen der minimale Wert der Abweichung des Beobachtungswertes vom ermittelten Schätzwert der Regressionsfunktion auftritt [88, 89]. Dabei wäre die Abweichung zwischen den beim Experiment ermittelten Werten der Zerspanungsparameter (hier: VB bzw. T) und den nach dem Modell berechneten Parametern minimal [87].

Die Auswertung der Versuche wurde an Hand eines an der Universität STANKIN entwickelten PC-Programms (OMEN extrasoft) bzw. des Softwarepaketes SPSS 11.5.1 der Firma SPSS Inc durchgeführt.

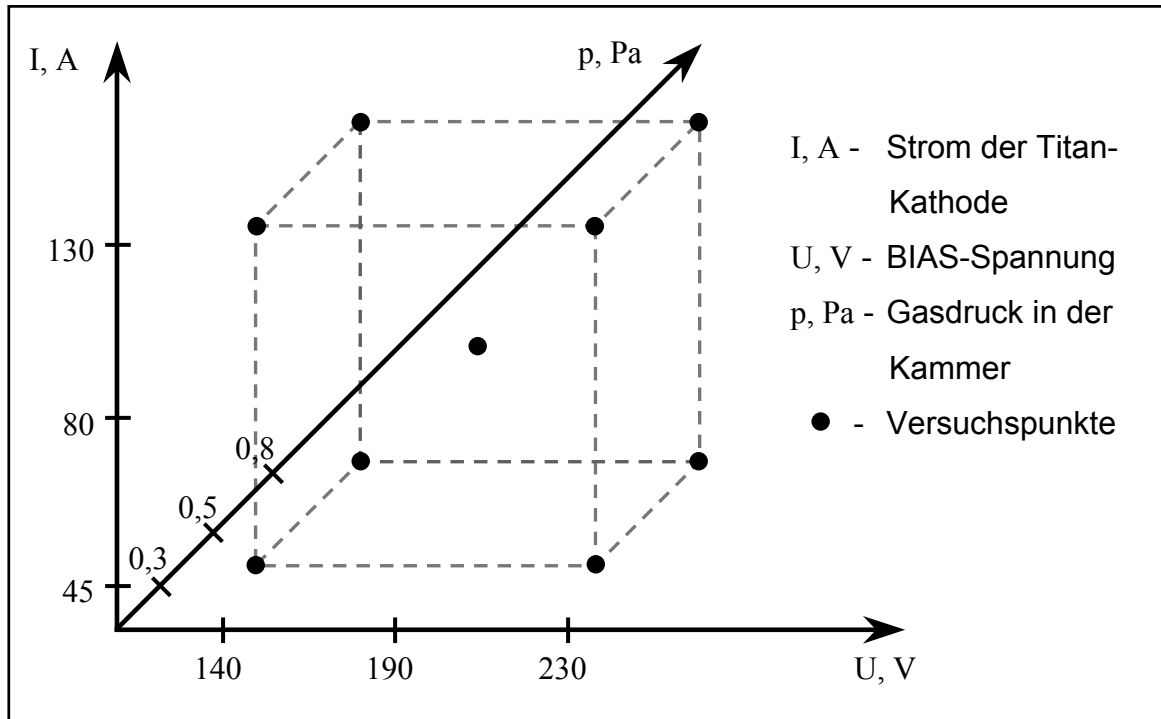


Bild 55: Versuchsplan für die Ermittlung der Modellparameter beim Drehen

Es wurde folgendes Standzeitmodell für das Drehen mit Hartmetallwendschneidplatten, die mit TiAlN (Schichtaufbau siehe oben) beschichtet wurden, für den Stahl C45 entwickelt:

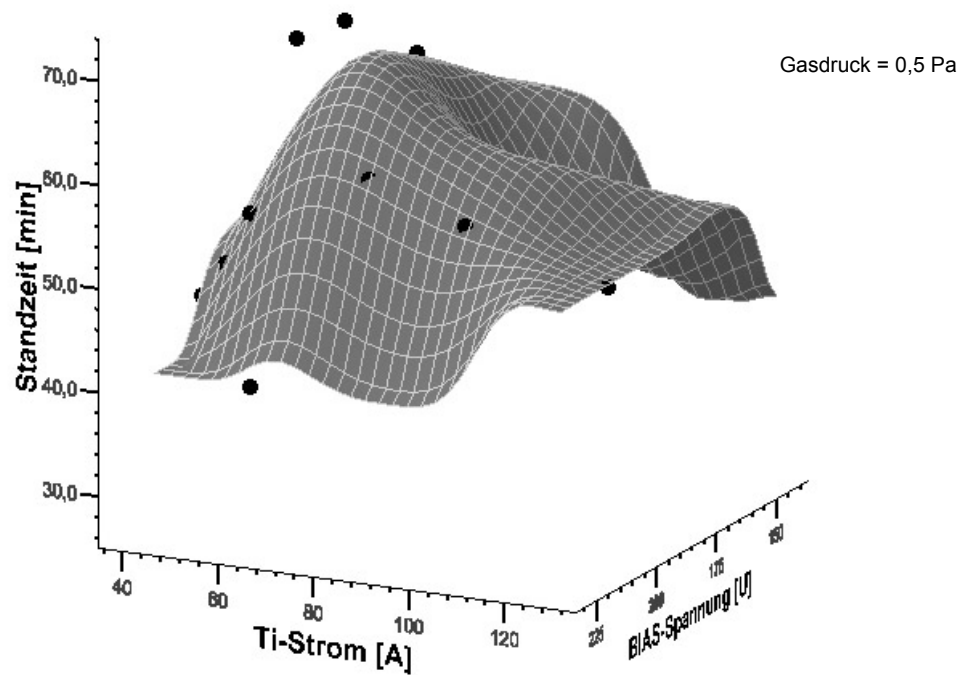
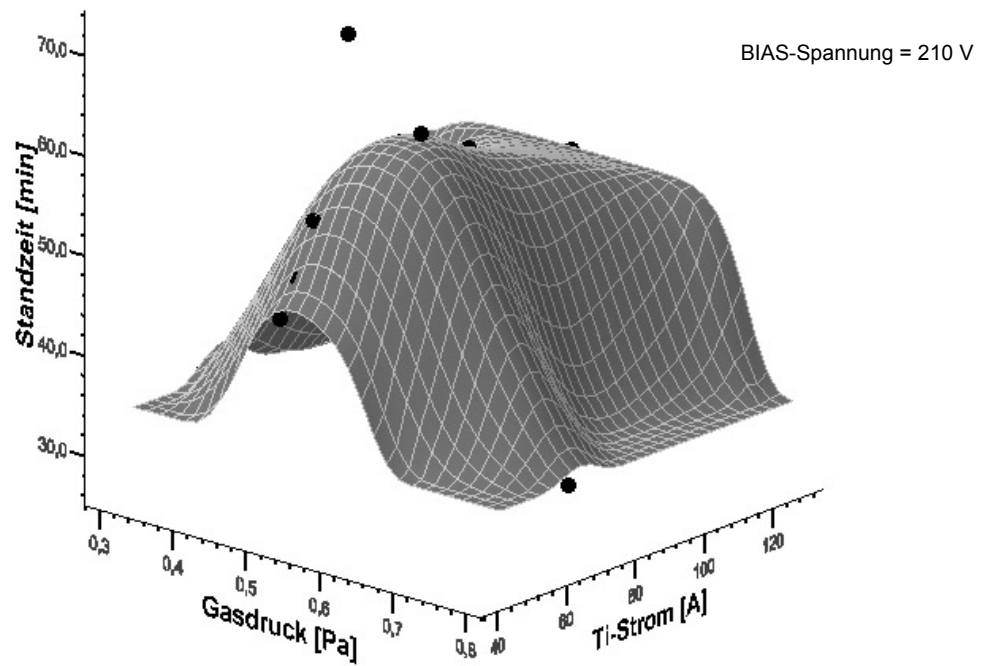
$$T = 2,48 \cdot 10^{-8} \cdot I^{1,25} \cdot p^{3,40} \cdot U^{5,59} \cdot \text{EXP}(-1,51 \cdot 10^{-2} \cdot I - 6,70 \cdot p - 3,23 \cdot 10^{-2} \cdot U) \quad (5)$$

Anhand dieser Modellgleichung wird der Grad der Beeinflussung der Standzeit des beschichteten Werkzeugs durch die einzelnen Abscheidungsparameter deutlich erkennbar. Die Größe des jeweiligen Exponenten gibt die Intensität der Beeinflussung ein. Beispielsweise hat die BIAS-Spannung den größten Einfluss auf die Standzeit (Exponent: 5,59). Der Gasdruck in der Vakuumkammer übt schon einen kleineren Einfluss auf die Standzeit des Werkzeugs (Exponent: 3,40) aus. Am wenigsten wird die Standzeit vom Strom der Titan-Kathode beeinflusst (Exponent: 1,25).

Die Abweichung der nach entwickeltem Modell berechneten Werte von den beim Experiment ermittelten Werten beträgt weniger als 10%, was für technische



Anwendungen ausreichend ist. Die graphische Veranschaulichung dieser Abweichung ist im *Bild 56* zu sehen.



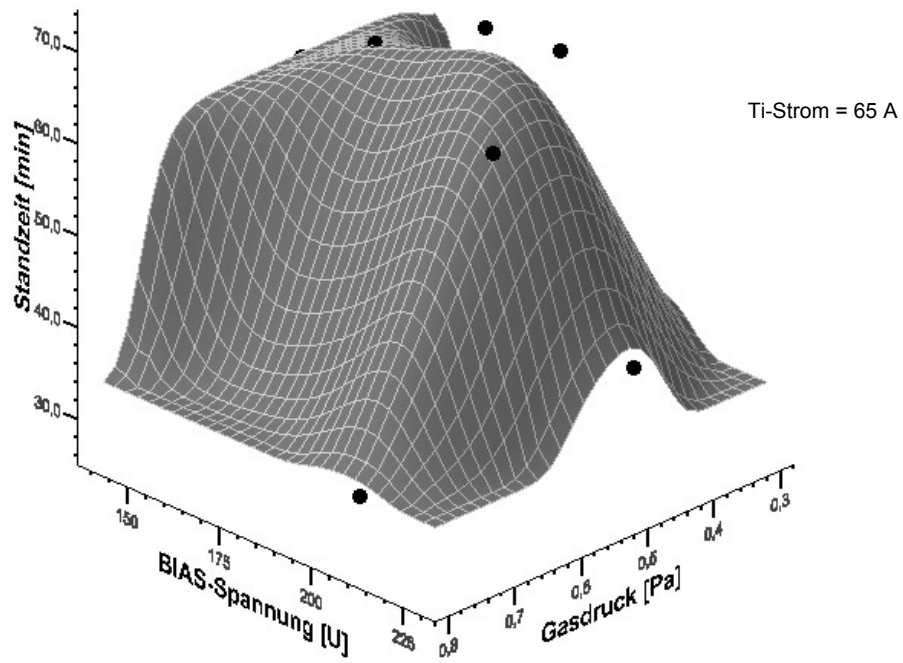


Bild 56: Graphische Veranschaulichung des Modells (Punkte: experimentell ermittelte Standzeiten; Fläche: mit dem Modell berechneter Standzeitverlauf)

## **6 OBERFLÄCHENBEHANDLUNG VON WERKZEUGEN DURCH IMPLANTATION BZW. IBAD UNTER EINSATZ HOCHENERGETISCHER METALLIONEN**

### **6.1 Stand der Technik**

Viele Anforderungen im Bereich der modernen Oberflächen- und Dünnschichttechnologie und der weiteren Entwicklungen auf diesem Gebiet lassen sich nur unter Zuhilfenahme von hochenergiereichen Strahltechniken erfüllen. Neben der Erzeugung von Mikrostrukturen gilt dies für Dünnschichtstrukturen oder Oberflächenschichten mit speziellen Eigenschaften. Insbesondere können durch kombinierte Verfahren, bei denen der kontrollierte Teilchenbeschuss mit einer geeigneten Depositionsmethode verknüpft und die aufwachsende Schicht gezielt mit hochenergetischen Teilchenstrahlen beschossen wird, Schichteigenschaften erzielt werden, die sich mit den üblichen Depositionsmethoden allein nicht herstellen lassen. Dabei bewirkt nach [90] neben der Art der Strahlteilchen vor allem die durch den Teilchenbeschuss zugeführte Energie eine Reihe von vorteilhaften Effekten:

- Die Deposition locker gebundener Teilchen und damit eine erhöhte Reinheit sowie vor allem eine Vergrößerung der Dichte der deponierten Schicht;
- eine erhöhte Beweglichkeit von deponierten Ionen, die eine Beeinflussung des Schichtwachstums im Anfangsstadium ermöglichen;
- die Erzeugung einer bestimmten Schichtmorphologie durch die Beeinflussung des Wachstumsprozesses oder durch gezieltes Einbringen von Gitterdefekten bis hin zum Aufbau amorpher Schichtstrukturen;
- die Durchmischung von Schicht- und Substratmaterial am Interface durch ballistische Prozesse oder strahlungsinduzierte Diffusion.

Unter Ausnutzung solcher Effekte lassen sich innere Spannungen gezielt auf- oder abbauen oder eine bestimmte Stöchiometrie des Schichtmaterials einstellen. Im Hinblick auf den jeweiligen Einsatzzweck können auf diese Weise Schichteigenschaften wie Härte, Haftung, elektrische Leitfähigkeit, optische

Transparenz optimiert werden. Dabei ist von Vorteil, dass durch den Ionenbeschuss die gewünschten Effekte ohne Temperaturerhöhung erzielbar sind. Dies ist insbesondere für thermisch instabile Schicht- oder Substratmaterialien von großer Bedeutung [91, 92, 93, 94].

### 6.1.1 Ionenimplantation (II)

Bei der Ionenimplantation wird die Substrat- bzw. Schichtoberfläche einem Teilchenstrom (Ionenstrom) hinreichend hoher Energie ausgesetzt, um in der Übergangszone Substrat/Schicht sowie im Substrat bzw. in der Schicht selbst Veränderungen zu verursachen. Untersuchungen der letzten Jahren zeigten, dass durch den definierten Einschuss hochenergetischer Ionen nicht nur die elektrischen Eigenschaften eines Festkörpers beeinflusst werden, sondern eine Vielzahl weiterer oberflächensensitiver physikalischer und chemischer Eigenschaften verändert werden können. Die Ionenimplantation ermöglicht demzufolge die Bildung von Randschichten mit Schichtkenngrößen, die sich von den Substratkenngrößen unterscheiden. Als Substratmaterial werden neben Metallen vor allem Keramiken, Gläser und auch Polymere genutzt.

Die Ionenimplantation bietet also die Möglichkeit, die chemische Zusammensetzung und Struktur des oberflächennahen Bereichs bis zu einer Tiefe von 1..3 µm in weiten Bereichen zu verändern, ohne dass Haft- oder Toleranzprobleme auftreten. Entscheidend ist hierbei, dass durch den Ioneneinschuss Schichtzustände bei Temperaturen von weniger als 150 °C gebildet werden können, die mit Verfahren, welche nahe dem thermodynamischen Gleichgewicht arbeiten, oftmals nicht herstellbar sind. Einige Prozessdaten für die Ionenimplantation sind in *Tabelle 6* zusammengestellt.

Tabelle 6: Prozessparameter der Ionenimplantation

Substrattemperatur, °C	Arbeitsdruck, Pa	Implantationstiefe, µm	Ionenenergie, keV
<150	$10^{-1}..10^{-3}$	bis 3	bis 200

### 6.1.2 Ionenassistierte Beschichtung (IBAD)

Bei diesem Verfahren erfolgt der Beschuss mit hochenergetischen Ionen während der Beschichtung. Durch den Ionenstrahl wird der wachsenden Schicht Energie zugeführt und zwar entweder in Form von Elektronenanregungen (electronic stopping) oder von Atomstößen (nuclear stopping). Ersteres führt bei Substraten und Schichten, die als chemische Verbindung vorliegen, zu chemischen Veränderungen, bei Elementen dagegen nur zu Aufladungserscheinungen [90].

Letzteres bewirkt eine Reihe von Prozessen, die die Eigenschaften des Schicht/Substrat-Systems stark beeinflussen. Die wichtigsten sind vor bzw. zu Beginn der Abscheidung:

- Reinigung des Substrats,
- Durchmischung und Verbreiterung des Grenzbereichs Schicht/Substrat;

während des Aufwachsens der Schicht:

- Oberflächendiffusion,
- Verdichtung der Schicht,
- manchmal Ausbildung spezieller Morphologien oder Texturen,
- manchmal Phasenbildung oder Amorphisierung [90].

### 6.1.3 Die Hochenergie-Ionenquelle

Das Kernstück der Beschichtungsanlage für die Ionenimplantation bzw. für die Ionenassistierte Beschichtung (IBAD) bildet die Hochenergie-Ionenquelle (siehe *Bild 57*). Diese Ionenquelle (Implantor) wird für die Legierung der Oberflächenschichten durch Bestrahlung mit hochenergetischen Ionen verschiedener fester, elektrisch leitender Materialien (Metalle, Legierungen, Komposite usw.) sowie für das Assistieren verschiedener PVD-Prozesse verwendet. Die Ionenenergien liegen zwischen den Bereichen Subimplantation, Ionenplattieren (ab 2 keV) und Ionenimplantation mit konventionellen Ionenbeschleunigerquellen (einige 100 keV).

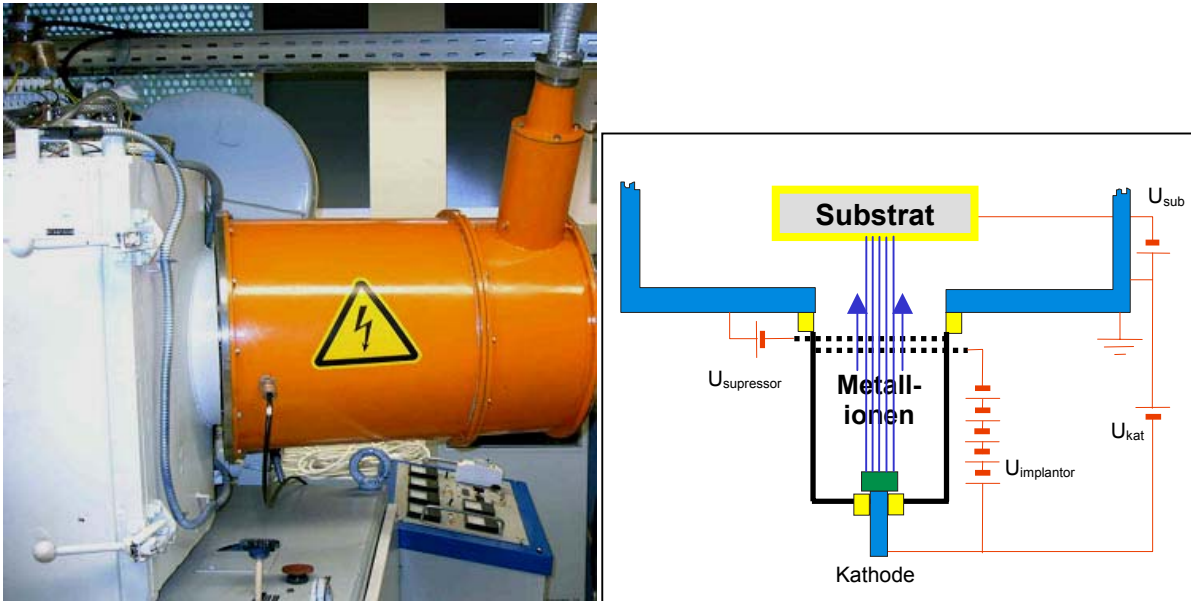


Bild 57: Hochenergie-Ionenquelle (Implantor)

### 6.1.3.1 Technische Daten des Implantors

Ionentyp:	Metalle
Plasmagenerationsmethode:	Lichtbogenentladung
Beschleunigungsspannung, kV:	1..40
Ladungszahl der Ionen:	1..5
Gitter-Beschleunigungsspannung, kV:	bis zu 30
Impulslänge des Ionenstrahls, $\mu$ s:	100..600
Impulsfrequenz, Hz:	1..100
mittl. Stromstärke des Ionenstrahls, mA:	bis zu 30
Impulsstrom, A:	bis zu 10
Maximale Ionenenergie, keV:	200
Apertur des Strahls am Beschleunigungsgitter, mm:	80
Strahlapertur bei einem Abstand von 250 mm vom Gitter, mm:	300

Das Gerät besteht aus 4 Modulen:

- Ionenquelle;
- Hochspannungsgenerator;
- kapazitiver Speicher;
- Steuergerät.

## 6.2 Herstellung und physikalische Charakterisierung behandelte Proben

Für diese Untersuchungen wurden die gleichen unbeschichteten Hartmetallwendeschnidplatten benutzt.

Zur physikalischen Analyse der plasmabehandelten und beschichteten Oberflächen wurden die angeführten Methoden und Geräte eingesetzt. Insbesondere wurde das Messgerät „Nanotest“, siehe *Bild 58*, für ein breites Spektrum von Messaufgaben an den Proben benutzt. Für weitere Untersuchungen (Elektronenmikroskopie, Röntgen-Stressanalyse) wurden geeignete Proben vorbereitet und beschichtet.



Bild 58: „Nanotest“ - Messgerät zur Erfassung mechanischer Eigenschaften von Beschichtungen und Oberflächenrandzonen; schematische Darstellung des Messaufbaus

(Quelle: Micro Materials Ltd. Wrexham, UK)

### 6.2.1 Probenherstellung

Zur Erprobung der Leistungsfähigkeit des Ionenplattier- (IP) bzw. ionenassistierten Beschichtungsverfahrens (IBAD) wurden erste Beschichtungstests mit der Niedertemperatur-PVD-Beschichtungsanlage an Hartmetallproben durchgeführt.

In *Tabelle 7* werden die variierten Beschichtungsparameter und Eigenschaften für eine Versuchsreihe von Hartmetall-Probekörpern dargestellt. Bei dieser Versuchsreihe wurde mittels der Veränderung des Beschichtungsparameters Beschleunigungsspannung die „Implantations-Ionenenergie“ variiert, um deren Einfluss auf solche Eigenschaften wie Schichtdicke, Härte und Adhäsion zu untersuchen. Die Probe TN01 wurde nach Standardtechnologie mit TiN beschichtet. Die Proben TN02-TN04 wurden mittels Cr-Ionenimplantation zur Substratvorbehandlung mit einheitlicher Beschleunigungsspannung  $U_{IMP}$  sowie mittels ionengestützter Beschichtung (IBAD) bei variiertem Beschleunigungsspannung  $U_{IBAD}$  präpariert.

### 6.2.2 Physikalische Labortests

Gegenüber der Vergleichsprobe TN01 (ohne Implantation) weisen die Proben TN03 und TN04, die eine Implantationsbehandlung während der Beschichtung bei Beschleunigungsspannungen  $U_{IBAD}$  von 20 kV und 30 kV erfahren haben, eine höhere Härte auf (siehe *Tabelle 7*, *Bild 59* und *Bild 60*). Eine derartige Steigerung der Beschichtungshärte um ca. 13% gegenüber der unbehandelten Probe TN01 ist mit Standardbeschichtungsverfahren nur durch die Substitution des Hartstoffes TiN durch ein anderes Hartstoffmaterial, wie z.B. ZrN, TiCrN, TiAlN, zu erreichen. Bei Beschleunigungsspannungen von 40 kV ist jedoch eine geringere Adhäsion zwischen Beschichtung und Substrat zu beobachten, was zu einer Härteverringerng des Gesamtsystems der beschichteten Probe auf Grund von Schichtabplatzungen infolge der mechanischen Beanspruchung bei den Nanotest-Messungen führte.

Die Beobachtungen zur Steigerung der Schichthärte durch Implantation sind konsistent mit den Ergebnissen der Vickers-Kleinlasthärte-Untersuchungen. Hier konnte außerdem bei Messungen mit hoher Last ( $HV_{0,2}$ ) eine Aufhärtung des



Substrates durch die erfolgte Implantation bei  $U_{IMP} = 20$  kV angezeigt werden. Die vermutete Ursache der schlechten Haftung bei der Probe TN04, eine durch die Implantation verursachte Erhöhung der Beschichtungseigenstressungen, muss durch eine Reproduktion der Probenabscheidung und die planmäßig vorgesehenen Röntgenstressmessungen nachverifiziert werden.

Tabelle 7: Beschichtungsparameter und Eigenschaften der Versuchsreihe TN01-04; Beschleunigungsspannungen ( $U_{IMP}$ ,  $U_{IBAD}$ ) bei Implantationsbehandlung vor bzw. während der Schichtabscheidung, Schichtdicke ( $d_s$ ), Vickers-Kleinlasthärten ( $HV_{0,05}$ ,  $HV_{0,2}$ ), Indentorhärte ( $H_{ind, 140nm}$ ) und Reduzierter Modul ( $E_{r, 140nm}$ ) bei einer plastischen Eindringtiefe von 140nm

Probe	$U_{IMP}$ [kV]	$U_{IBAD}$ [kV]	$d_s$ [nm]	$HV_{0,05}$	$HV_{0,2}$	$H_{ind, 140nm}$ [Gpa]	$E_{r, 140nm}$ GPa	Schichtabplatzungen bei Vickerseindruck ( $HV_{0,2}$ )
TN01	0	0	3,3	2157	1805	29,7	456,6	gering
TN02	20	20	3,1	2438	1938	29,5	427,5	Keine
TN03	20	30	3,8	2373	1938	32,8	462,4	Keine
TN04	20	40	3,4	2194	2035	35,4	426,1	stark

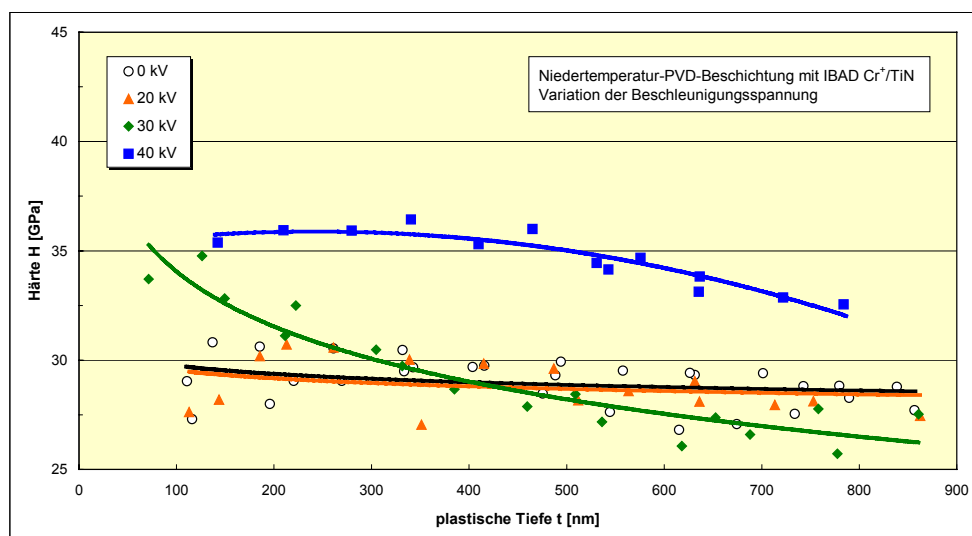


Bild 59: Härte der mit IBAD-behandelten Wendeschneidplatten

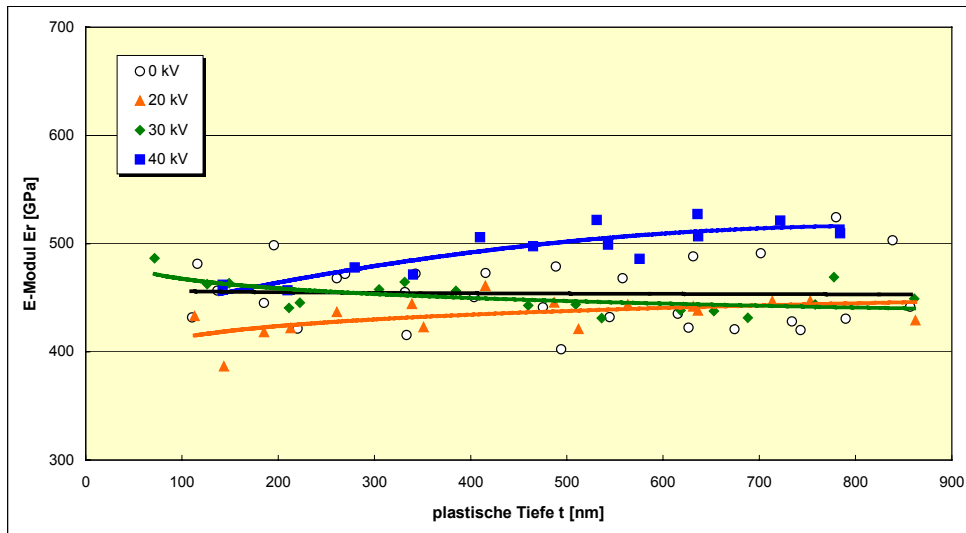


Bild 60: E-Modul der mit IBAD-behandelten Wendeschneidplatten

### 6.2.3 Stressanalyse

Es wurden röntgenographische Eigenspannungsanalysen an fünf mit TiN+IBAD bzw. TiAlN beschichteten Hartmetallproben durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden im Zentrum für Eigenspannungs- und Texturanalyse (Hahn-Meitner-Institut Berlin) realisiert.

#### 6.2.3.1 Messbedingungen, Auswerteparameter

Die Messungen wurden mit  $\text{CoK}\alpha$  Strahlung ( $\lambda = 0.178897 \text{ nm}$ ) ohne  $k_\beta$ -Filter unter den Betriebsbedingungen 32 kV / 50mA im symmetrischen  $\Psi$ -Modus der RSA (Probenkipfung um Achse in der Beugungsebene) durchgeführt. Durch die Verwendung einer Polykapillarsemilinse der Firma IFG im primären sowie einer Sollerblende + Sekundärmonochromator im sekundären Strahlengang wurde eine Quasi-Parallelstrahlanordnung realisiert, die neben der Möglichkeit sehr streifender Beugungsbedingungen den zusätzlichen Vorteil bietet, dass der Einfluss von Kanteneffekten in Form einer falschen Probendicke auf das Messergebnis minimiert werden kann.

An allen Proben wurden  $\sin^2\psi$ -Spannungsanalysen durchgeführt. Dazu wurde ein breiter  $2\theta$ -Bereich von  $40^\circ$ ... $100^\circ$ , der die stärksten Interferenzen der Schichtstruktur enthält, unter den  $\psi$ -Neigungswinkeln  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $70^\circ$  und  $80^\circ$  in positiver Kipprichtung vermessen. Die angeführten  $\psi$ -Winkel fallen mit den Intensitätspolen der am häufigsten auftretenden Beschichtungstexturen zusammen, so dass aus diesen Messungen unter der Annahme einer rotationssymmetrischen Kristallorientierungsverteilung bezüglich der Schichtnormalen auch Aussagen zur vorliegenden Fasertextur gewonnen werden können. Die Schrittweite  $\Delta 2\theta$  in den einzelnen Scans betrug jeweils  $0,15^\circ$ . Pro Winkelschritt wurde die gebeugte Intensität über 20s aufintegriert.

Zur Spannungsanalyse wurden, den jeweiligen schichtspezifischen Gegebenheiten entsprechend, mehrere Interferenzen herangezogen. Die diffraktionselastischen Konstanten (DEK) wurden nach dem Eshelby/Kröner-Modell aus den elastischen Konstanten  $c_{ijkl}$  des Einkristalls berechnet (*Bild 61*).

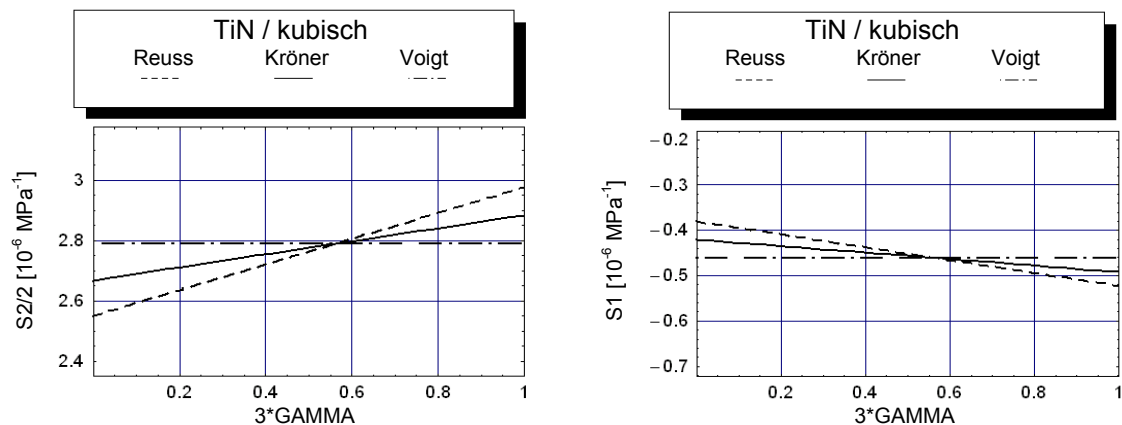


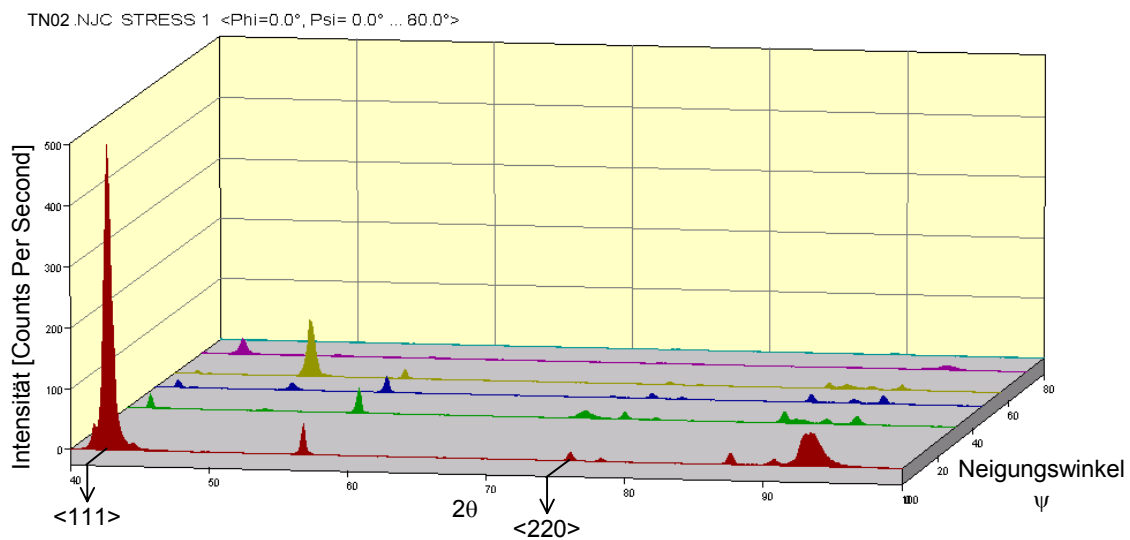
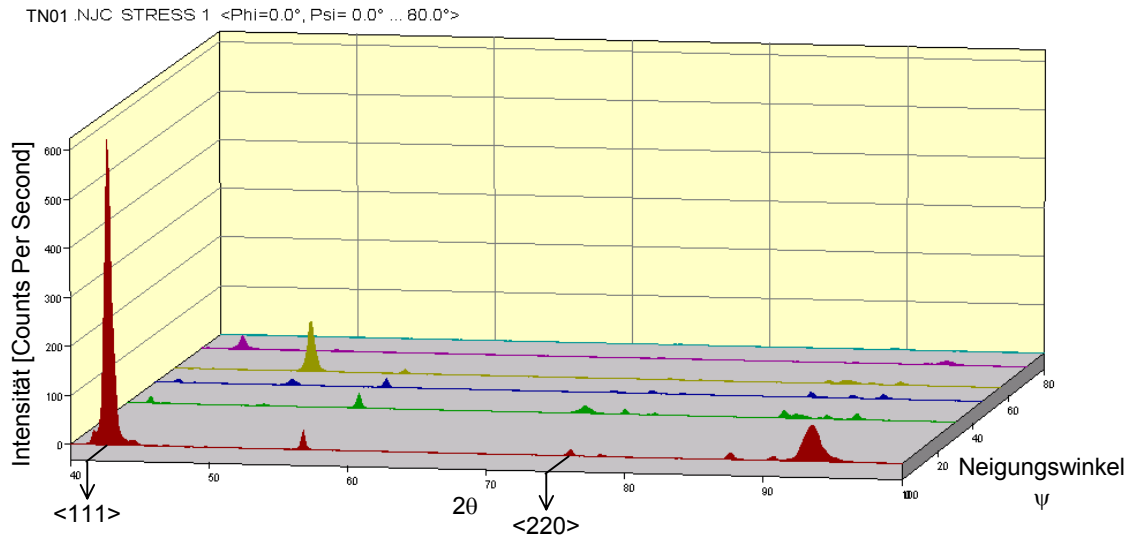
Bild 61: DEK von TiN, berechnet nach den Modellen von Voigt, Reuss und Kröner

## 6.2.3.2 Auswertung

### 6.2.3.2.1 Diffraktogramme

*Bild 62* zeigt die unter den verschiedenen Neigungswinkeln  $\psi$  aufgenommenen Diffraktogramme für die einzelnen Schichten. In allen Fällen ist eine stark ausgeprägte  $\langle 111 \rangle$ -Textur erkennbar. Für kleine  $\psi$ -Winkel (große Eindringtiefe)

treten außerdem die Substratinterferenzen des WC-Hartmetalls auf. Da sich die Schicht- und Substratinterferenzen zum Teil überlagern, wurden die  $\sin^2\psi$ -Analysen auf die TiN-Interferenzen 111 ( $2\theta = 42.8^\circ$ , Auswertung für  $\psi = 0^\circ, 70^\circ$  und  $80^\circ$ ) sowie 220 ( $2\theta = 73.2^\circ$ ) beschränkt.



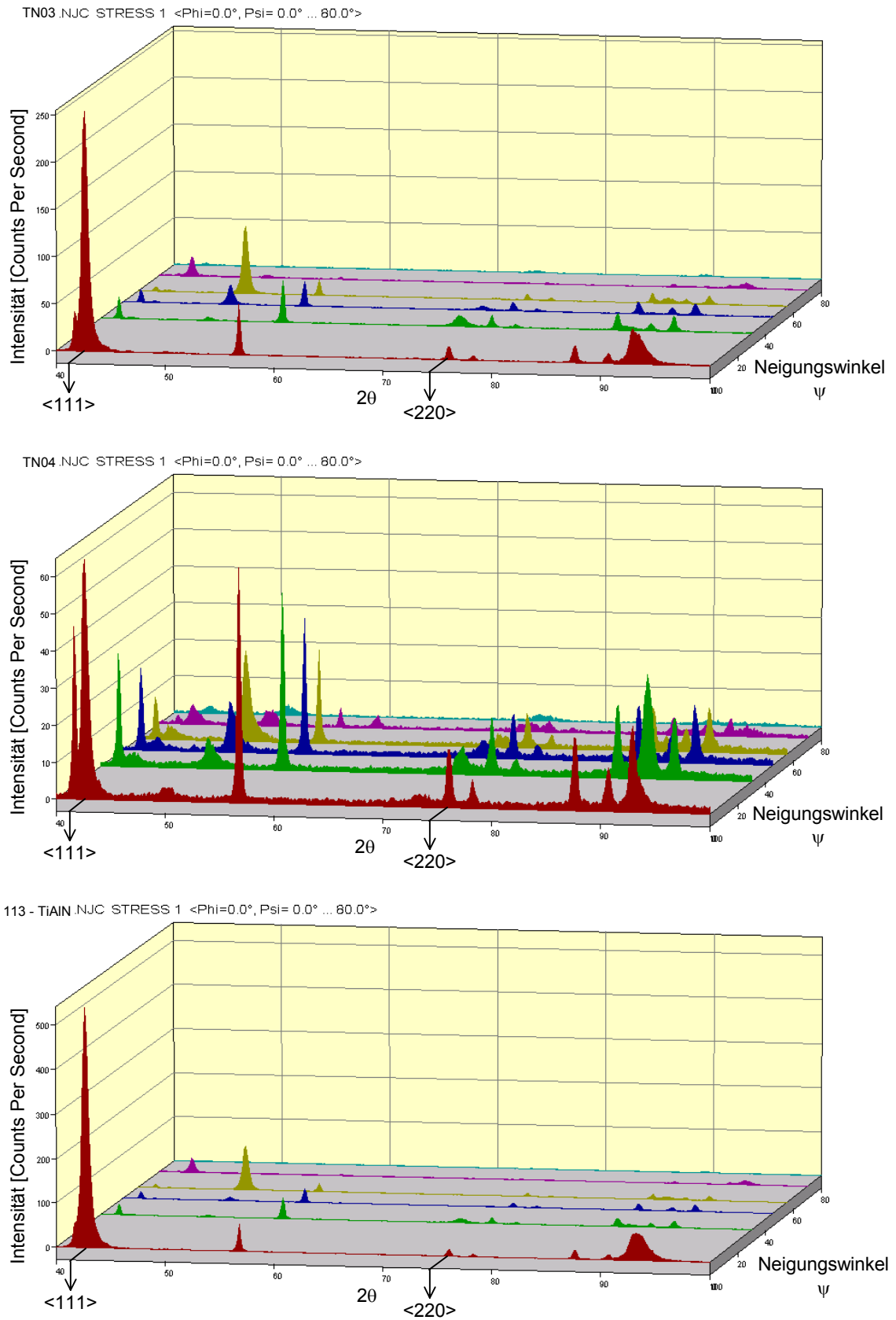


Bild 62: Diffraktogramme der einzelnen Schichten, aufgenommen unter verschiedenen  $\psi$ -Neigungswinkeln

### 6.2.3.2.2 Eigenspannungsanalyse

Bild 63 zeigt die an den einzelnen Schichten ermittelten  $d_{\psi}(220) - \sin^2\psi$ -Diagramme. Der stark negative Anstieg der Regressionsgeraden zeigt das Vorhandensein hoher intrinsischer Druckeigenspannungen in den Schichten an.

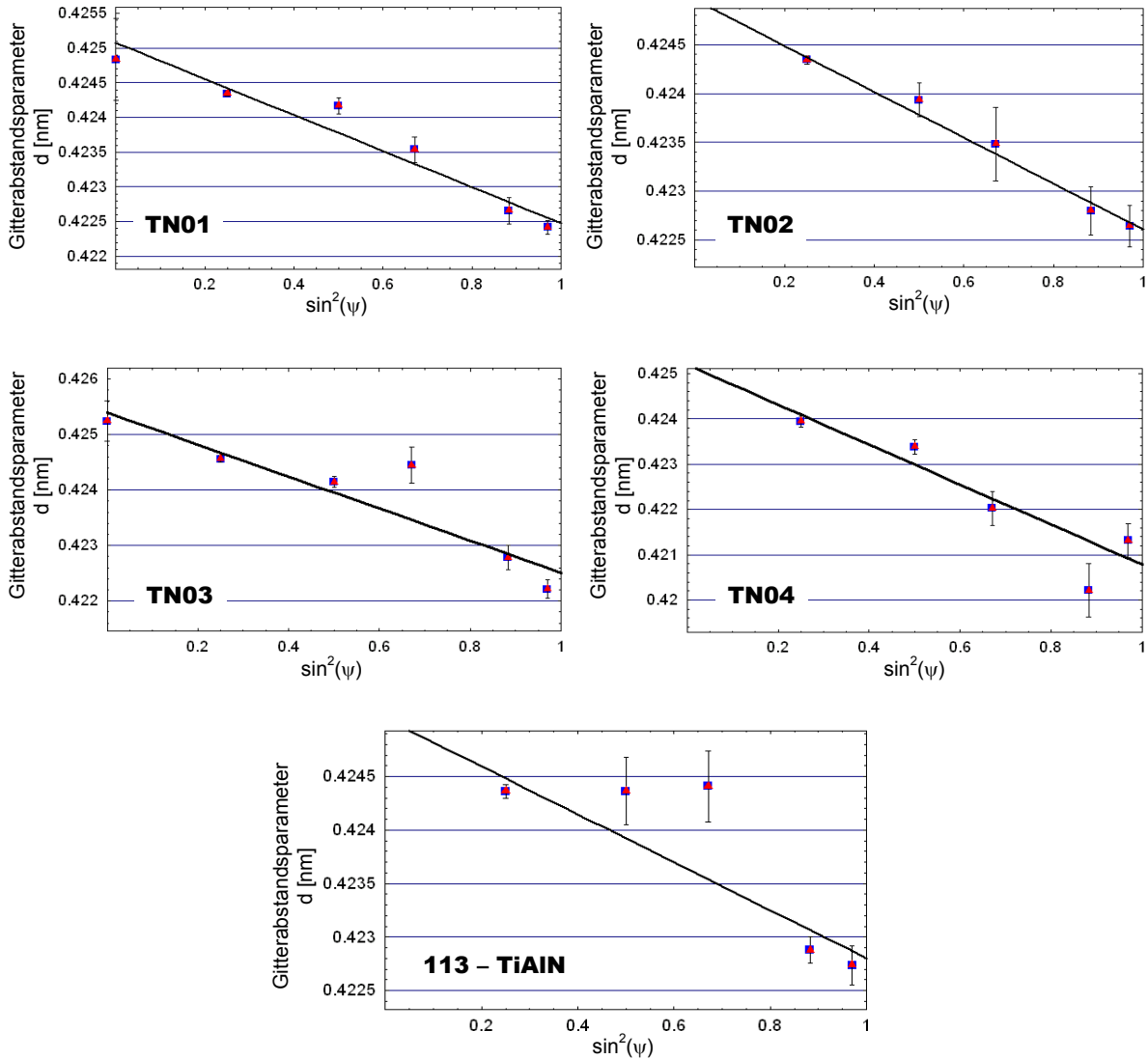


Bild 63:  $d_{\psi}(220) - \sin^2\psi$ -Verteilungen für die verschiedenen Schichten

Die Ergebnisse der Spannungsanalysen sind in *Tabelle 8* zusammengefasst. Angegeben sind die für die einzelnen Interferenzen ermittelten Spannungswerte sowie der entsprechende Mittelwert. Den Daten ist zu entnehmen, dass die Druckeigenspannungen ( $\sigma_{II}$ ) mit zunehmender Beschleunigungsspannung ( $U_{IBAD}$ ) zunehmen.

Tabelle 8: Zusammenstellung der Ergebnisse der Eigenspannungsanalyse

Probe	$\sigma_{  }$ [MPa]		
	111	220	Mittelwert
TN01 - TiN	$-2050 \pm 181$	$-2162 \pm 263$	-2106
TN02 - TiN	$-2617 \pm 336$	$-1957 \pm 124$	-2287
TN03 - TiN	$-2870 \pm 501$	$-2402 \pm 455$	-2636
TN04 - TiN	$-4817 \pm 624$	$-3684 \pm 778$	-4250
113 – TiAlN	$-2728 \pm 724$	$-1868 \pm 496$	-2298

Die vergleichsweise großen Unsicherheiten in den Spannungswerten sind ihrer Ursache nach im Wesentlichen auf die teilweise starken Streuungen der d-Werte zurückzuführen. So sind die Interferenzen zwischen den Texturpolen nur sehr schwach ausgeprägt, was sich in entsprechenden Unsicherheiten in der Linienlagenbestimmung niederschlägt. Die Unterschiede zwischen den für die beiden ausgewerteten Interferenzen ermittelten Spannungswerte sollten im Zusammenhang mit netzebenenabhängigen Mikroeigenspannungen II. Art diskutiert werden.

### 6.3 Untersuchung der Leistungsfähigkeit behandelter Zerspanwerkzeuge beim Drehen

#### 6.3.1 Versuchsergebnisse und Auswertung

Es wurde die Untersuchung der Einflüsse der Behandlung mit hochenergetischen Metallionen auf die Zerspanbarkeitseigenschaften durchgeführt. Dafür wurden einige Stichversuche vorgenommen. Die untersuchten Wendeschneidplatten sind in *Tabelle 9* beschrieben. Das Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten für die getesteten Hartmetallwendeschneidplatten ist in *Bild 64 - Bild 65* dokumentiert.

Bei den Drehversuchen zeigte sich eine deutliche Abhängigkeit der Standzeit von den Behandlungsparametern bzw. von der Behandlungskombination. Die Ergebnisse zeigen eine Standzeitsteigerung der mit hochenergetischen Metallionen behandelten Platten um 15..20 % im Vergleich zu den konventionell beschichteten Wendeschneidplatten. Die besten Standzeitergebnisse zeigte die Wendeschneidplatte, die die Probenbezeichnung IP/TiN/IP hatte.

Tabelle 9: Beschreibung der untersuchten Wendeschneidplatten

Probenbezeichnung	Beschreibung der Behandlung
Unb.	Unbeschichtete bzw. unbehandelte Referenzplatte
TiN konv.	Konventionelle mit TiN beschichtete Wendeschneidplatte
TiN+IBAD	TiN mit IBAD beschichtete Wendeschneidplatte
IP/TiN/IP	Mit Ionenimplantation vorbehandelte, danach mit TiN konventionell beschichtete und danach mit Ionenimplantation nachbehandelte Wendeschneidplatte

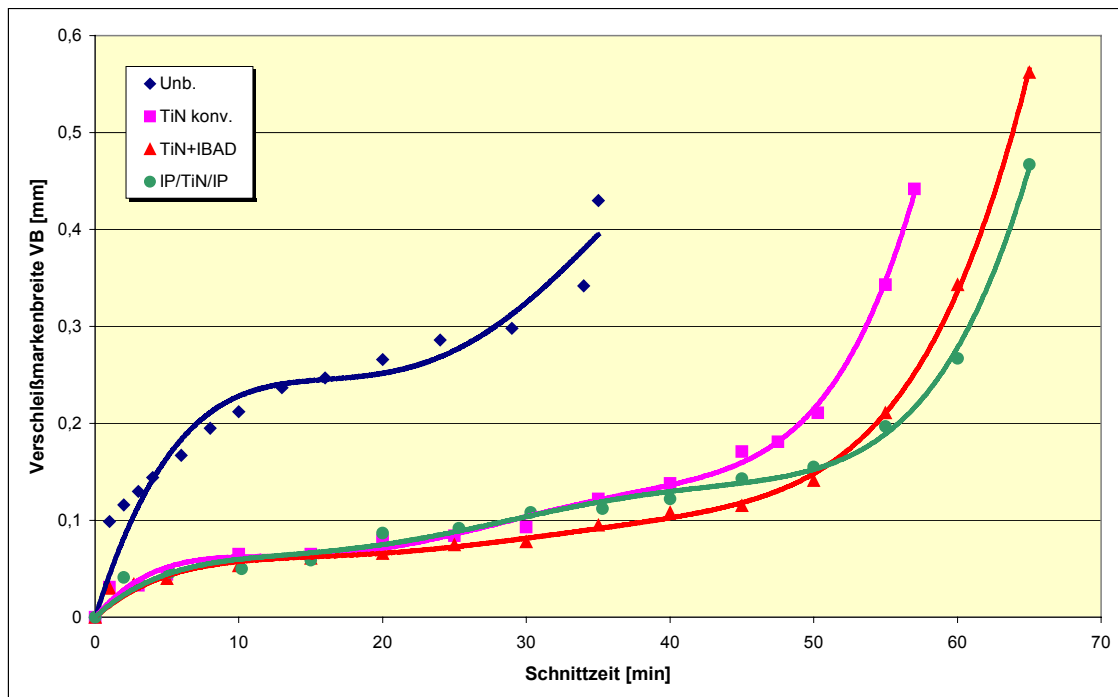


Bild 64: Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten (für VB) von mit hochenergetischen Metallionen behandelten Hartmetallwendeschneidplatten



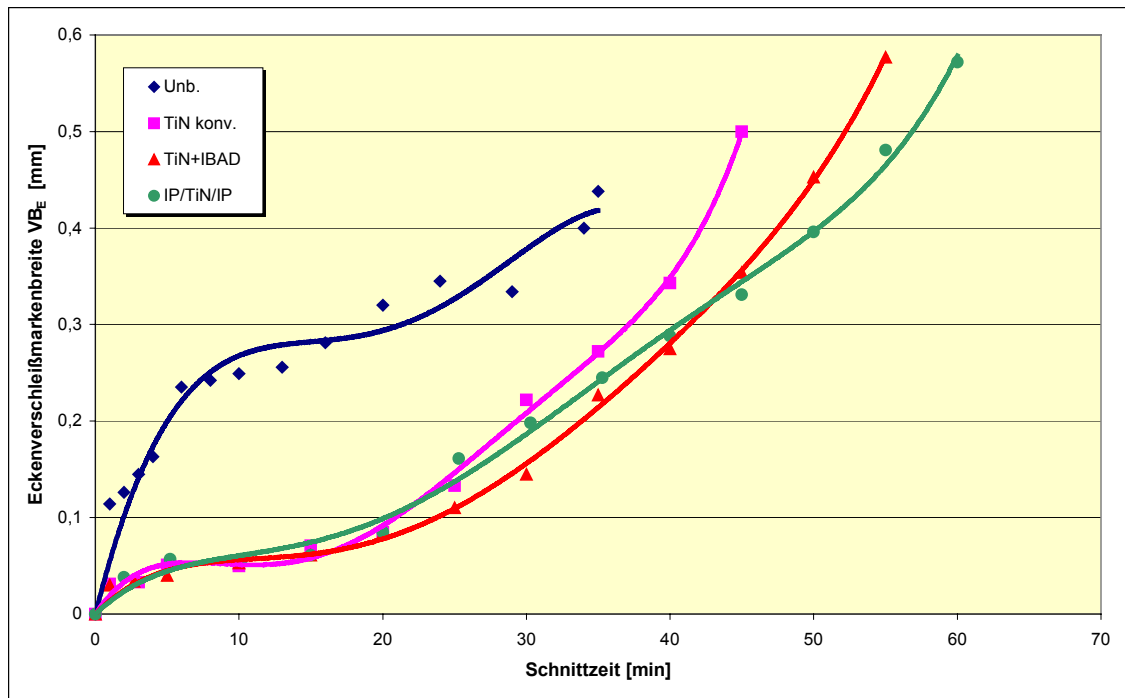


Bild 65: Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten (für  $VB_E$ ) von mit hochenergetischen Metallionen behandelten Hartmetallwendschneidplatten

## 6.4 Diskussion der Ergebnisse

Wie in *Tabelle 7* gezeigt ist, bleibt die Schichtdicke aller Proben fast unveränderlich. Mit der zunehmenden Beschleunigungsgitterspannung der Metallionenquelle, besonders für Spannungen  $\geq 30$  kV, nehmen die Härte und das E-Modul der Schichten (beide bei 140 nm Eindringtiefe) deutlich zu. Im *Bild 59* sind die Abhängigkeiten der Schichthärte von der Eindringtiefe für die verschiedenen Implantationsgitterspannungen zu sehen. Bei Stromspannungen  $\geq 30$  kV zeigen die Härte-Kurven eine deutliche Wirkung der Implantation an. Bei der Implantationsspannung von 30 kV wird nur das nahe Oberflächengebiet gehärtet. Die 40 kV-Kurve weist eine Härteerhöhung in einer Tiefe von 1  $\mu\text{m}$  der Beschichtung auf.

Die XRD-Untersuchungen haben bewiesen, dass alle behandelten Proben eine  $\langle 111 \rangle$ -Kristallgitterstruktur besitzen. Das ist eine typische Eigenschaft für den

größten Teil der ionenbehandelten Arc-PVD-Beschichtung. Die Ergebnisse der röntgenographischen Eigenspannungsanalyse (XSA) sind in *Tabelle 8* sowohl für  $\langle 111 \rangle$  als auch  $\langle 220 \rangle$  Texturen veranschaulicht. Es ist festzustellen, dass mit der zunehmenden Energie der implantierten Cr-Ionen die negativen Eigenspannungen (Druckspannungen) der mit assistierter Implantation abgeschiedenen Schichten zunehmen. Solche Mikro-Druckspannungen verhindern die Bildung von Mikrorissen und erhöhen die Standzeit des Werkzeugs [95].

Die starke Abhängigkeit zwischen den mikroskopischen Strukturparametern der Eigenspannungen und der makroskopischen mechanischen Eigenschaften wie Härte und E-Modul ist eine wohlbekanntes Tatsache. Aus diesem Grund korrespondieren die XSA-Ergebnisse gut mit den Nanotest-Ergebnissen.

Gemäß erwähntem Scratchtest-Verfahren wurden die verschiedenen Stadien der Haftfestigkeit mit mehr als nur einem kritischen Lastwert festgestellt:

- $L_{C1}$  - es kommen erste Risse an den Rändern der Kratzspur vor;
- $L_{C2}$  - Beginn der totalen Schichtablösung vom Rand zum Rand oder partielle Schichtabplatzungen;
- $L_{C3}$  - totale Schichtabplatzung vom Rand zum Rand über einen großen Bereich der Kratzspur.

Für "high-energy" Ionen ( $U_{IBAD} \geq 30$  kV) wurde beobachtet, dass mit der zunehmenden Beschleunigungsspannung der Ionen und als Folge der zunehmenden negativen Eigenspannungen (Druckspannungen) der behandelten Schichten die kritische Last abnimmt (siehe *Tabelle 10*). Jedoch ist auch erkennbar, dass die mit 20 kV implantierte Schicht eine relativ hohe Haftung besonders für die höheren Werte der kritischen Last  $L_{C2}$  und  $L_{C3}$  im Vergleich nicht nur zu den anderen behandelten Proben, sondern auch zu den unbeschichteten Proben aufweist. Die sehr niedrige Eigenspannung der Probe TN02, für die die  $\langle 220 \rangle$ -Textur bestimmt wurde, scheint ein nicht schlechtes Ergebnis zu sein. Ein niedriges Niveau der Eigenspannung, die die Wirkung der Implantation mit den 20 kV beschleunigten "low-energy" Ionen senkt, verursacht die niedrigen Werte der Härte und den reduzierten Modul dieser beschichteten Probe, die sich kaum von den Werten der unbeschichteten Probe (TN01) unterscheiden.

In *Bild 64* und *Bild 65* wird das Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten von mit hochenergetischen Metallionen behandelten Hartmetallwendeschnidplatten für verschiedene Behandlungsvariationen illustriert. Die ersten Drehtestergebnisse zeigen die Verminderung der Verschleißmarkenbreite bzw. Steigerung der Standzeit der mit der 30 kV Beschleunigungsspannung behandelten Probe um ca. 50 % bzw. um 15..20 % im Vergleich zu der unbehandelten Probe.

Tabelle 10: Scratchtest-Ergebnisse für IBAD-behandelte Proben

Probe	$L_{C1}$ [N]	$L_{C2}$ [N]	$L_{C3}$ [N]
TN01 - TiN	8,8	11,8	58,9
TN02 - TiN	6,9	21,6	63,8
TN03 - TiN	2,0	9,8	54,0
TN04 - TiN	1,5	2,0	24,5

In *Bild 64* und *Bild 65* ist das Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten von der IBAD-behandelten Wendeschnidplatte (TiN+IBAD) im Vergleich zu der durch eine Kombination von der Implantation des Hartmetallsubstrates, Abscheidung der TiN-Schicht ohne Implantation und Nachimplantation der abgeschiedenen Schicht (IP/TiN/IP) dargestellt.

Im *Bild 64* ist veranschaulicht, dass in den ersten 40 Minuten das Verschleiß-Schnittzeit-Verhalten der Probe IP/TiN/IP und der Probe TiN völlig gleich sind. Jedoch nach 40 Minuten der Schnittzeit beginnt sich die Verschleißgeschwindigkeit der konventionellen TiN-Probe zu erhöhen. Nach 52 Minuten weist die IP/TiN/IP-Probe sogar kleinere Verschleißmarkenbreiten als die IBAD-behandelte Probe (TiN+IBAD) auf. Man kann annehmen, dass sowohl die Implantation des Hartmetallsubstrates mit hochenergetischen Cr-Ionen als auch die ionengestützte Beschichtung die Härteerhöhung und als Folge die Verschleißreduzierung bzw. Standzeitsteigerung verursacht haben [93, 94, 95].

Diese Stichversuche beweisen, dass die Kombination der Metallionen-Implantation und Arc-PVD-Beschichtungstechnologie eine sehr vielversprechende

Methode für die Modifizierung von Schneideigenschaften der Zerspanwerkzeuge darstellt. So ist es möglich, die Härte der Beschichtung um ca. 20 % durch eine Cr-Implantation mit einer Beschleunigungsspannung von 40 kV zu vergrößern. Jedoch bedingt die Implantation nicht immer nur eine höhere Härte; sie verursacht auch eine schlechtere Schichthaftung, die zur Zunahme der Mikroeigenspannungen führt. Deshalb sind für eine gezielte Erhöhung der Leistung von Zerspanwerkzeugen weitere Untersuchungen über die Wirkung der Metallionenimplantation sowohl auf die verschiedenen Verschleißschutzschichten als auch auf die Hartmetallsubstrate zu empfehlen.

## 7 WIRTSCHAFTLICHKEITS- UND KOSTENABSCHÄTZUNG

Die PVD-Schichten auf TiAlN-Basis dominieren in den letzten Jahren immer stärker den Markt der beschichteten Hochleistungswerkzeuge.

Die Gründe dafür liegen in den hervorragenden Eigenschaften der TiAlN-basierten Schichten. Sie weisen eine hohe Härte bei niedriger interner Spannung auf. Die hohe Wärmebeständigkeit führt zu Härteverlusten von nur 30 bis 40 Prozent bei Temperaturen bis 800 °C. Die Schichten zeichnen eine hohe Oxidationsbeständigkeit aus. Die Oxidationsrate bei 800 °C (etwa 15 bis 20  $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ ) entspricht der von TiCN bei 400 °C und TiN bei 550 °C. Schließlich sorgt die geringere Wärmeleitfähigkeit für eine bis zu 30 Prozent niedrigere relative Wärmeeindringung in das Werkzeug gegenüber TiN. [82, 96]

Um diese guten Eigenschaften noch zu verbessern, wurden in dieser Arbeit folgende Maßnahmen getroffen:

- ✓ Filterung von ARC-Makropartikeln,
- ✓ Parameteroptimierung (Kathodenstrom, BIAS-Spannung, Gasdruck),
- ✓ Abscheidung von Multilayers,
- ✓ Addition von zusätzlichen Legierungskomponenten (Chrom).

Die Vorteile des in dieser Arbeit verwendeten Abscheidungsverfahrens und der Beschichtungsanlage im Vergleich zu den industriellen Anlagen und Prozessen bestehen darin, dass statt der kostspieligen gemischten Kathoden getrennte Kathoden (Ti und Al) verwendet wurden. Außerdem kann man dabei das Ti/Al-Verhältnis in der TiAlN-Schicht und dadurch ihre mechanischen Eigenschaften und ihr Standzeitverhalten beeinflussen, was experimentell bewiesen wurde. Ein weiterer Vorteil der verwendeten Beschichtungstechnologie besteht in der kleineren Prozessdauer (ca. 2 fach) gegenüber der konventionellen Technologie, was mit der Anwendung der kombinierten Elektronen- und der Infrarot-substratheizung verbunden ist.

Um die ökonomische Effektivität des in dieser Arbeit verwendeten Beschichtungsverfahrens abzuschätzen, wird ein Vergleich mit den existierenden

industriellen Verfahren (z.B.: Verfahren der Firma Metaplas Ionon GmbH) angestellt. Für die Vereinfachung der Abschätzung wird eine relative Einschätzung vorgenommen. Als Referenzwert (100 %) werden die Kosten für die herkömmlichen industriellen Beschichtungsanlagen bzw. Verfahren herangezogen.

Schätzungsparameter	industrielle PVD-Beschichtungsanlagen	verwendete PVD-Beschichtungsanlage
Preis der Anlage	100 %	ca. 65..80 %
Betriebsstromkosten	100 %	100 %
Kühlwasserverbrauch	100 %	100 %
Gasverbrauch	100 %	100 %
Beschichtungsdauer	100 %	ca. 60..65 %
Kosten für Kathoden	gemischte TiAl-Kathode 100 %	1 x Al-Kathode + 1 x Ti-Kathode = ca. 20..30 %
Möglichkeit, das Ti/Al-Verhältnis zu variieren	nein	ja

Diese grobe Kosteneinschätzung zeigt, dass das verwendete Verfahren für das Beschichten von Zerspanwerkzeugen mit Verschleißschutzschichten auf TiAlN-Basis im Vergleich zu konventionellen industrieüblichen Verfahren flexibler und kostengünstiger ist.

## 8 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Ziel der Arbeit war es, die Potentiale der Leistungssteigerung von Hartmetallwerkzeugen zu ermitteln, die durch den Einsatz eines verbesserten Beschichtungsverfahrens mit verschleißfesten Hartstoffschichten auf TiAlN-Basis versehen wurden. Zu diesem Zweck wurden Hartmetallwendeschneidplatten mit verschiedenen Varianten von TiAlN-Beschichtungskomplexen beschichtet.

Das komplexe Oberflächenbehandlungsverfahren mit gepulstem bzw. konstantem Plasmastrom wurde zur effizienten Oberflächenbehandlung bzw. TiAlN-Beschichtung von Zerspanwerkzeugen aus Hartmetall eingesetzt. Die wichtigsten Vorteile dieses Verfahrens sind:

- ✓ Für die Erzeugung der TiAlN-Beschichtung werden keine teuren Metalle verwendet;
- ✓ es besteht die Möglichkeit, die neutralen Partikel zu filtern, was für die Verdampfung leichtschmelzender Metalle (z.B.: Aluminium) notwendig ist;
- ✓ für die Schichtabscheidung werden getrennte Kathoden (Aluminium und Titan), die wesentlich billiger und technisch gerechter als gemischte Kathoden sind, verwendet;
- ✓ es gibt die Möglichkeit, die Schichteigenschaften (wie Schichtdicke, Schichthärte, Schichtzusammensetzung usw.) durch Veränderung der Abscheidungsbedingungen (wie Gasdruck, Kathodenstrom, BIAS-Spannung, Abscheidungsdauer usw.) zu variieren bzw. zu optimieren;
- ✓ die Beschichtungsdauer ist wesentlich kleiner als bei industrieüblichen Verfahren bzw. Anlagen.

Im Vergleich zu einem anderen verbreiteten PVD-verfahren, dem Sputtern (Kathodenzerstäuben), besitzt die angewendete Arc-Technologie folgende Vorzüge:

- ✓ Es besteht die Möglichkeit für das Ionenplattieren;
- ✓ hohe Ionisierbarkeit für Metallionen (bis zu 95 %);
- ✓ wesentlich höhere Abscheidungsrate.

Für die abgeschiedenen TiAlN-Hartstoffschichten ist zutreffend, dass sie sowohl bezüglich ihrer Schichtparameter als auch bezüglich der erreichbaren Standzeiten durchaus unterschiedlich sind. Dabei wurde festgestellt, dass die Abscheidungsparameter bzw. der Schichtaufbau einen deutlich großen Einfluss auf die Schichtparameter und als Folge dessen auf die technologischen Parameter haben.

Wie in Zerspantests unter realen Einsatzbedingungen nachgewiesen wurde, können Hartmetallwerkzeuge, die nach dieser Plasmatechnologie behandelt wurden, in ihrem Leistungspotenzial ganz wesentlich gesteigert werden. Es konnte gezeigt werden, dass sich mit einer Variation der TiAlN-Beschichtungen auf Hartmetall-Wendeschneidplatten beim Drehen deutliche Standzeiterhöhungen gegenüber unbeschichteten Referenzwendeschneidplatten bei gleichzeitiger Verbesserung der Oberflächenqualität der erzeugten Fläche und der Senkung der Zerspankräfte erreichen lassen.

Es wurde festgestellt, dass eine Veränderung bzw. Optimierung der Eigenschaften der TiAlN-Beschichtungen durch Variation der Beschichtungsparameter (wie Verdampferstrom, Gasdruck in der Kammer, BIAS-Spannung) und Beschichtungsarchitektur ermöglicht werden kann. Das alles ist ohne aufwendigen Umbau (z.B.: die Kathodenzusammensetzung bzw. -anzahl bleibt unverändert) in der gleichen Beschichtungsanlage realisierbar.

Ausgerichtet auf die technologischen Einsatzbedingungen beim Außenlängsdrehen wurde die Beschichtungstechnologie für TiAlN-Beschichtungskomplexe optimiert. Bezüglich des Kriteriums Standzeiterhöhung wurden die optimalen Prozessparameter bestimmt. Diese Technologie kann mit den optimierten Parametern direkt zur Oberflächenbehandlung der Werkzeuge für die industrielle Praxis mit ähnlichen Einsatzprofilen wie die getesteten Hartmetall-Wendeschneidplatten für das Drehen angewendet werden.

An Hand der Auswertung der Versuche wurde ein mathematisches Modell, das den Zusammenhang zwischen der Standzeit des beschichteten Hartmetallwerkzeuges und den Abscheidungsparametern (Strom der Ti-Kathode, Gasdruck in der Kammer, BIAS-Spannung) festlegt, konzipiert und berechnet. Die



Abweichung der nach entwickeltem Modell berechneten Werte von den experimentell ermittelten Werten betrug weniger als 10%, was für technische Anwendungen ausreichend ist.

Die verwendete kombinierte Ionenstrahl- und Beschichtungstechnologie und die entsprechende Beschichtungsanlage besitzen ein noch wesentlich breiteres Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten. Aufgrund umfangreicher Variationsmöglichkeiten der Beschichtungsparameter und des Einsatzes neuer und weiterentwickelter Beschichtungsmodule kann das gesamte Feld der Oberflächenbehandlung der Hartmetall- bzw. Stahlsubstrate, wie z.B. die von Zerspan-, Schneid- und Umformwerkzeugen und Bauteilen, durch diese Technologie abgedeckt werden.

Es wurde schließlich gezeigt, dass die Kombination der Metallionen-Implantation und Arc-PVD-Beschichtungstechnologie eine sehr vielversprechende Methode für die Modifizierung von Schneideigenschaften der Zerspanwerkzeuge darstellt. Für die weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit von Zerspanwerkzeugen ist die gezielte Behandlung mit hochenergetischen Metallionen von Werkzeugen sowohl während der Beschichtung (ionenassistierte Beschichtung) als auch vor und nach der Abscheidung des Verschleißschutzkomplexes (Ionenimplantation) von großem Interesse. Sie enthält noch weitere Effektivierungs-Potenziale.



---

## LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Spur, G.; Stöferle, T.: Handbuch der Fertigungstechnik. Band 3/1. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1979
- [2] Edison, T. A.: Process of Duplicating Phonograms. US Patent 484 582, 1892
- [3] Vereschaka, Anatoli S.: Rabotosposobnost reshuschego instrumenta s iznosostojkimi pokrytijami. Moskau : Maschinostrojenie, 1993
- [4] Steffenhagen, J.: Hartstoffbeschichtung von Zerspanwerkzeugen unter Anwendung von kombinierter Ionenstrahl- und Beschichtungstechnologie. Magdeburg : Universität, Diplomarbeit, 1997
- [5] Frey, H.; Kienel, G.: Dünnschichttechnologie. Düsseldorf : VDI-Verlag, 1. Auflage, 1987
- [6] Pulker, H. K.: Verschleiß-Schutzschichten unter Anwendung der CVD/PVD-Verfahren. Sindelfingen : Expert-Verl., 1985
- [7] Kienel, G. (Hrsg.): Vakuumbeschichtung. Band 2. 1. Auflage, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993
- [8] Rother, Bend; Vetter, Jörg: Plasma-Beschichtungsverfahren und Hartstoffschichten. 1. Auflage, Leipzig : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1992. – ISBN 3-342-00649-8
- [9] Suhr, H.: Beschichtungsverfahren mit plasmaunterstützter Chemical Vapour Deposition. In: Plasmagestützte Verfahren der Oberflächentechnik / VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.). 1. Auflage, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1990
- [10] Peters, R.-J. (Red. Konzeption): Beschichten mit Hartstoffen / VDI Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.). Düsseldorf : VDI-Verl., 1991
- [11] Drobniowski, J.; Schier, V.: PVD-Beschichtungen für die Metallzerspanung Einsatzmöglichkeiten und Grenzen. In: Tagungsband MPK'99, Magdeburg, Mai 1999, S. A03/01-07

- [12] Dübner, L.; Panckow, A.: Kombinierte Ionenstrahl- und Beschichtungstechnologie. Forschungsbericht, Kultusministerium LSA, 1998
- [13] Mack, M.: Oberflächentechnik, Verschleißschutz. Verlag Moderne Industrie, 1990
- [14] Boxman, R.L.; Goldsmith, S.; Greenwood, A.: 25 Years of Progress in Vacuum-Arc Research and Utilization. In: IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 25, 1997, S. 1174-1186
- [15] Lugscheider, E.; Knotek, O.; Barimani, C.; Zimmermann, H.: Arc PVD-Coated Cutting Tools for Modern Machining Applications. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 94-5, 1997, S. 641-646
- [16] Schultrich, B.; Siemroth, P.; Scheibe, H.J.: High-Rate Deposition by Vacuum-Arc Methods. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 93, 1997, S. 64-68
- [17] Vetter, J.; Perry, A.J.: Applications of Arc-Deposited Coatings. In: Handbook of Vacuum Arc Science and Technology, ed. R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin, Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, 1995, S. 493-518
- [18] Simon und Thoma: Angewandte Oberflächentechnik für metallische Werkstoffe. München/Wien : Hauser Verlag, 1989
- [19] Javor-Sander, M.: Beschichtung von Funktionsflächen im Arc-PVD-Prozess. In: Produktionstechnik - Berlin, München : Hanser, 1995
- [20] Ertürk, H.-J.; Heuvel, H.-J.; Dederichs, H.-G.: Comparison of the Steered and Random Arc Techniques. In: Surface and Coatings Technology 39/40, 1989, 455-464
- [21] Rickery, D.S. et al.: The Role of Titanium in the Abrasive Wear Resistance of Physically Vapour-Deposited TiN. In: Surface and Coatings Technology 41, 1990, S. 63-74
- [22] Aksenov, I.I.; Andreev, A.A.; Bren, V.G.; Vakula, S.I.; Gavrilko, I.V.; Kudryavtseva, E.E.; Kunchenko, V.V.; Lokoshko, V.V.; Miroshnichenko, J.T.; Padalka, V.G.; Romanov, A.A.; Soprykin, L.I.; Strelnitsky, V.E.; Tolok, V.T.; Khoroshykh, V.M.; Chikryzhov, A.M.: Vacuum Coatings Obtained by

- Condensation of Plasma Flows in Vacuum : The Method of Condensation with Ionic Bombardement. In: Ukrainskij Fisitscheskij Journal 24, 1979, S. 515-525
- [23] Steffens, H.D. et al.: Reduction of Droplet Emission in Random Arc Technology. In: Paper presented at the 17<sup>th</sup> International Conference on Metallurgical Coatings ICMC-17, April 2-6, 1990, San Diego, California, USA.
- [24] Tai, C.N. et al.: Macroparticles on TiN Films Prepared by Arc Ion Plating Process. In: Surface and Coatings Technology 43/44, 1990, 324-335
- [25] Akari, K.; Tamagaki, H.; Kumakiri, T.; Tsuji, K.; Koh, E.S.; Tai, C.N.: Reduction in Macroparticles During the Deposition of Titanium Nitride Films Prepared by Arc Ion Plating. In: Surface and Coatings Technology 43/44, 1990, S. 312-323
- [26] Sarthrum, P.; Coll, B.F.: Plasma and Deposition Enhancement by Modified Arc Evaporation Source. In: Surface and Coatings Technology 50, 1992, 103-109
- [27] Coll, B.F.: Plasma and Deposition Interactions with an Enhanced Arc. In: Thin Films, ed. G.Hecht, F. Richter, and J. Hahn, DGM Oberursel : Informationsgesellschaft, 1994, S. 3-17
- [28] Coll, B.F.; Sanders, D.M.: Design of Vacuum Arc-Based Sources. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 81, 1996, S. 42-51
- [29] Alterkop, B.A.; Zhitomirsky, V.N.; Goldsmith, S.; Berman, R.L.: Propagation of Vacuum-Arc Plasma Beam in a Toroidal Filter. In: IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 24, 1996, S. 1371-1377
- [30] Schulke, T.; Anders, A.; Siemroth, P.: Macroparticle Filtering of High-Current Vacuum-Arc Plasmas. In: IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE 25, 1997, S. 660-664
- [31] Shi, X.; Tay, B.K.; Flynn, D.I.; Ye, O.; Sun, Z.: Characterization of Filtered Cathodic Vacuum-Arc System. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 94-95, 1997, S. 195-200
- [32] Keidar, M.; Beilis, I.I.; Aharonov, R.; Arbilly, D.; Boxman, R.L.; Goldsmith, S.: Macroparticle Distribution in a Quarter-Torus Plasma Duct of a

- Filtered Vacuum-Arc Deposition System. In: JOURNAL OF PHYSICS D-APPLIED PHYSICS 30, 1997, S. 2972-2978
- [33] Schultrich, B.; Scheibe, H.J.; Drescher, D.; Ziegele, H.: Deposition of Superhard Amorphous-Carbon Films by Pulsed Vacuum-Arc Deposition. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 98, 1998, S. 1097-1101
- [34] Boxman, R.L.; Zhitomirsky, V.; Alterkop, B.; Gidalevich, E.; Beilis, I.; Keidar, M.; Goldsmith, S.: Recent Progress in Filtered Vacuum-Arc Deposition. In: SURFACE & COATINGS TECHNOLOGY 87-88, 1996, S. 243-253
- [35] Martin, P.J.; Bendavid, A.: Review of the filtered arc process and materials deposition. In: Thin Solid Film 394, 2001, S. 1-15
- [36] Lehner, F.: Neue Hartstoff- und Diffusionsschichten mittels Pulsplasma-CVD. In: Vortragsveranstaltung der Fördergemeinschaft Dünne Schichten e.V.: Neue Anwendungen für moderne Oberflächentechnologien, Nürnberg, 4./5.11.1996
- [37] Rauschenbach, B.: Einsatz der Plasma-Immersion-Implantation zur Oberflächenmodifizierung. In: Vortragsveranstaltung der Fördergemeinschaft Dünne Schichten e.V.: Neue Anwendungen für moderne Oberflächentechnologien, Nürnberg, 4./5.11.1996
- [38] Büschel, M.; Grimm, W.: Influence of the pulsing of the current of a vacuum arc on rate and droplets. In: Surface and Coatings Technology 142-144, 2001, S. 665-668
- [39] Fuchs, H.; Engers, B.; Hettkamp, E.; Mecke, H.; Schultz, J.: Deposition rate and thickness uniformity of thin films deposited by a pulsed cathodic arc process. In: Surface and Coatings Technology 142-144, 2001, S. 655-660.
- [40] Kampschulte, G.; Olbrich, W.; Fessmann, J.: Verbundprojekt: PVD-Verfahren bei niedrigen Temperaturen und neue Schichtsysteme : Teilvorhaben: Carbid- und Nitridschichtsysteme zur Beschichtung von Zerspanungswerkzeugen bei niedrigen Temperaturen. In: Dünnschichttechnologien '92 / Fellenberg, R. (Hrsg.). Düsseldorf : VDI-Verlag, 1992, S. 584-591

- [41] Olbrich, W.; Kampschulte, G.: Superimposed pulse bias voltage used in arc and sputter technology. In: Surface and Coatings Technology 59, 1993, S. 274-280
- [42] Steffens, H.-D.; Brandl, W.: Moderne Beschichtungsverfahren : Vorträge eines Fortbildungsseminars der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V.. Dortmund, 1992
- [43] König, W.; Droese, A.: Leistungsfähigkeit und Verschleißverhalten von hartstoffbeschichteten Zerspanwerkzeugen. In: Hartstoffschichten zur Verschleißminderung. Bad Honnef : Informationsgesellschaft Verlag, 1986
- [44] Hedengvist et al.: How Tin Coatings improve performance of high speed steel cutting tools. In: Surface and Coating Technology 41, 1990
- [45] D'Haen; Quaeyhaegens; Stols: Interface study of physical vapour deposition Tin Coating on plasma-nitrided steels. In: Surface and Coatings Technology 61, 1993
- [46] Laimer: Development in the deposition of hard coatings by plasmaassisted techniques. In: Vacuum 40, 1990, S. 1-2
- [47] Vereschaka, Anatoli S.: Material Science in Russia. In: International trends in Manufacturing towards the 21th century. Berlin, Oktober 1991
- [48] Wnukow, Jurij: Nanesenie isnosostojkich pokritij na reschuschij instrument. Kiew : Technika, 1992
- [49] Tabakow, W.G.: Isnosostojkije pokritija na osnovе nitrida titana, legirowannogo schelesom i aluminiem. Moskau : Stanki i instrument, 1991
- [50] Tabakow, W.G.: Powischenie rabotosposobnosti reschuschego instrumenta putem napravlennogo ismenenija swojstw pokritija. In: Westnik maschinostroenija 12, 1989
- [51] Coll; Sathrum; Fontana: Optimization of arc evaporated (Ti,Al)N films composition for cutting tool application. In: Surface and Coating Technology 52, 1992
- [52] Knotek; Breidenbach; Jungblut; Loffer: Superhard Ti-B-C-N Coatings. In: Surface and Coating Technology 43/44, 1990
- [53] Kyu Taek Hyum; Hung Hoon Joo; Bono Hee Hanh: Three-demensional Grain size control for simultaneous improvement of hardness and impact

- adhesion in (Ti,Al)N films on high speed steel. In: Surface and Coating Technology 39/40, 1989
- [54] Treglio; Trujillo; Perry: Deposition of TiB<sub>2</sub> of low temperature with low residual stress by a vacuum arc plasma source. In: Surface and Coating Technology 61, 1993
- [55] Prengel, H.-G.: PVD-Arc-Ion-Plating zur Herstellung von nitridischen Titan-Aluminium-Basis-Hartstoffschichten. In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5, Nr. 205, Düsseldorf : VDI-Verlag GmbH, 1990
- [56] Krämer, G.: Arc-PVD-Beschichtung von Hartmetallen für den unterbrochenen Schnitt. In: Grund- und Werkstoffe, Nr. 290, (Diss. Universität Aachen), Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993
- [57] Knotek, O.; Löffler, F.; Krämer, G.: Substrate- and Interface-related Influences on the Performance of Arc-Physical-Vapour-Deposition-Coated Cemented Carbides in Interrupted-Cut Machining. In: Surface and Coatings Technology 54/55, 1992, S. 476-481
- [58] Vancoille, E.; Celis, J.P.; Roos, J.R.: Mechanical Properties of TiN, Ti,Al)N, TiNb)N and Ti(C,N) Coatings Measured by Nanoidentation. In: Thin Films in Tribology. ed. D. Dowson et al., Elsevier Science Publishers B.V., 1993, S. 311-320
- [59] König, W. u.a.: Arc-PVD-Beschichtung von Hartmetallen und Analyse des funktionellen Verhaltens beim Zerspanen im unterbrochenen Schnitt. In: Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 24, 1993, S. 131-141
- [60] Wolf, R.; Anklam, J.: Anwendungen und Eigenschaften der neuen Gleitschicht MOST<sup>®</sup>. In: Vortragsveranstaltung der Fördergemeinschaft Dünne Schichten e.V.: Neue Anwendungen für moderne Oberflächentechnologien, Nürnberg, 4./5.11.1996
- [61] Meerkamm, H.; Krumpiegl, T.; Fruth, W.: PVD-Verschleißschutzschichten für tribologische Anwendungen in ungeschmierten Maschinenelementen In: Vortragsveranstaltung der Fördergemeinschaft Dünne Schichten e.V.: Neue Anwendungen für moderne Oberflächentechnologien, Nürnberg, 4./5.11.1996



- [62] Ehrhardt, H.: Dünnschichttechnologie. In: Technologie & Management 43, 1994, S. 3
- [63] Matthews, A.; Holmberg, K.; Franklin, S.: A Methodology for Coating Selection. In: Thin Films in Tribology. ed. D. Dowson et al., Elsevier Science Publishers B.V., 1993, S. 429-439
- [64] Nanoschichten für Hochleistungswerkzeuge. In: Werkzeug Technik, Januar/Februar/März 2003
- [65] Lierath, Friedhelm.; Vereschaka, Anatoli S.; Dübner, Limara; Panckow, Andreas; Lapin, Valeri: Physikalisches Plasmaverfahren zur Oberflächenveredelung von Metallen. Offenlegungsschrift, 1999 DE 19733517A1
- [66] Panckow, Andreas N.; Steffenhagen, Jörg; Lierath, Friedhelm: Advanced coating architectures deposited by pulsed and filtered arc ion-plating. In: Surface and Coating Technology 163 – 164, Elsevier, 2003, S. 128 - 134
- [67] Lierath, F., Dübner, L., Panckow, A., Steffenhagen, J., Wegener, B.: Application of a novel Vacuum-Arc Ion-Plating Technology for the Design of Advanced wear resistant coatings. In: Surface and Coating Technology. 138, 2001, S. 71-76
- [68] Krämer, G.: Arc-PVD-Beschichtung von Hartmetallen für den unterbrochenen Schnitt. In: Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5, Nr. 290, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993
- [69] Prengel, H.-G.: PVD-Arc-Ion-Plating zur Herstellung von nitridischen Titan-Aluminium-Basis-Hartstoffschichten. In: Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5, Nr. 205, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1993
- [70] König, W., Kammermeier, D.: Prüfen und Bewerten von Schichteigenschaften anhand von Zerspan- und Analogieversuchen. In: VDI-Bericht : Prüfen und Bewerten von Oberflächenschutzschichten. Nr. 702, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1988
- [71] Brune, M., Gramlich, M.: Reibung und Verschleiß. In: Moderne Beschichtungsverfahren / Steffens, H.-D.; Wilden, J. (Hrsg.). 2. Aufl., Dortmund : DGM Informationsgesellschaft Verlag, 1996

- [72] Höhl, F.; Stock, H.-R. et.al.: Entwicklung verschleißfester TiN-Schichten für Zerspanwerkzeuge. In: Mat.-wiss. u. Werkstofftech. (MATWER) 24, 1993
- [73] Kienel, G. (Hrsg.): Vakuumbeschichtung. Band 3, 1. Auflage, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1994
- [74] Fa. Fischer: Bedienungsanleitung Betascope
- [75] Steffenhagen, J.: Arc-PVD-Technologie für die Hartstoffbeschichtung. Magdeburg : Otto-von-Guericke-Universität, Fakultät für Maschinenbau, Großer Beleg, 1996
- [76] Kienel, G. (Hrsg.): Vakuumbeschichtung. Band 3, 1. Auflage, Düsseldorf : VDI-Verlag, 1994
- [77] Blumenauer, H. (Hrsg.): Werkstoffprüfung. 5.Aufl., Leipzig : Deutscher Veralag für Grundstoffindustrie, 1989
- [78] Hornbogen, E.; Skrotzki, B.: Werkstoffmikroskopie. 2. Auflage, Berlin/Heidelberg : Springer Verlag, 1993
- [79] Weber, H.; Loladze, T.N.; Herberger, J.; Leopold, J.; Lutze, H.; Meyer, W.; Zimmermann, P.: Grundlagen des Spanens. 1. Auflage; Berlin : VEB Verlag Technik, 1986. - ISBN 3-341-00038-0
- [80] König, Wilfried: Studium und Praxis : Fertigungsverfahren. (Drehen, Fräsen, Bohren). Band 1, 4. Aufl., Düsseldorf : VDI-Verl., 1990. - ISBN 3-18-401054-6
- [81] Tönshoff, Hans K.: Spanen : Grundlagen. Springer-Verlag, 1995. - ISBN 3-540-58742-X
- [82] Cselle, Tibor und andere: LARC : Neue, industrielle Beschichtungstechnologie. In: WB 3/2003. S. 12-16
- [83] Ohne Angaben: MAXIT<sup>®</sup>: PVD-Verschleißschutz. In: Übersichtsinformation Nr. 4 der METAPLAS IONON 01/2003
- [84] Bunshah, Rointan F. (Editor): Handbook of deposition technologies for filmsand coatings : Science, technology and applications. 2<sup>nd</sup> edition. New Jersey : Noyes Publications, 1994. - ISBN 0-8155-1337-2

- [85] Tschätsch, Heinz: Handbuch spanende Formung : Verfahren, Werkzeuge, Berechnung, Richtwerte. Heinz Tschätsch. – Verl., 1988. - ISBN 3-87807-155-8
- [86] Degner, Werner; Lutze, Hans; Smejkal, Erhard: Spanende Formung : Theorie, Berechnung, Richtwerte. 15. Auflage, Carl Hanser Verlag, 2002. - ISBN 3-446-22138-7
- [87] Scharipow, Oleg A.: Powyschenije effektivnosti i obespetschenije nadezhnosti resanija instrumentom is twerdogo splawa s isnosostojkim pokrytijem : dissertazija na soiskanije utschenoj stepeni kandidat technitscheskich nauk. Moskau : Universität STANKIN
- [88] Bronstein, I.N.; Semendjajew, K.A.: Taschenbuch der Mathematik. 25. Auflage, Stuttgart/Leipzig : B.G. Tuebner Verlagsgesellschaft und Moskau : Verlag Nauka, 1991. - ISBN 3-8154-2000-8
- [89] Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: Multivariate Analysemethoden : eine anwendungsorientierte Einführung. 6. Auflage, Berlin/Heidelberg/NewYork/Tokyo : Springer-Verlag, 1990. - ISBN 3-540-52851-2
- [90] Kienel, Gerhard (Hrsg.); Behringer, Uwe: Vakuumbeschichtung : Verfahren und Anlagen. Teil 2, Düsseldorf : VDI-Verl., 1995. - ISBN 3-18-401312-X
- [91] Tolopa, A.: TAMEK Vacuum Arc Techniques for Metal Ion and Plasma Surface Engineering. In: Surface and Coatings Technology 98, 1998, S. 901-907
- [92] Tonghe, Z.; Huixing, Z.; Changzhou, J.; Xiaoji, Z.; Yuguang, W.; Furong, M.; Hong, L.; Hanzhang, S.; Jianzhong, S.: Industrialization of MEVVA Source Ion Implantation. In: Surface and Coatings Technology 128-129, 2000, S. 1-8
- [93] Wang, D.-Y.; Chiu, M.-C.: Characterization of TiN Coatings Post-Treated by Metal-Plasma Ion Implantation Process. In: Surface and Coatings Technology 156, 2002, S. 201-207
- [94] Chang, K.L.; Han, S.; Lin, J.H.; Hus, J.W.; Shih, H.C.: The Effect of MEVVA Implanted Cr on the Corrosion Resistance of CrN Coated Low

- Alloy Steel by Cathodic Arc Plasma Deposition. In: Surface and Coatings Technology 172, 2003, S. 72-78
- [95] Vasin, C.A.; Vereschaka, A.S.; Kushner, V.S.: Pesanije materialov : Termomehanitscheskij podhod k sisteme vzaimosvasej pri resanii. Moskau : Bauman-Universität, 2001. - ISBN 5-7038-1823-0
- [96] Knodt, Steffen; Markworth, Lars: Werkzeug- und Formenbau : Freiformflächenbearbeitung heute und morgen. In: Perspektiven der Zerspantechnik : Entwicklung und Integration der Fertigungsprozesse von morgen. Tagungsband. Aachen : WZL RWTH Aachen, 2002, S. 123-155. - ISBN 3-926690-10-0
- [lfd.] Nocol, Natascha; Albrecht, Ralf: Wissenschaftliche Arbeiten schreiben mit Word 97 : Formvollendete und normgerechte Examens-, Diplom- und Doktorarbeiten. 1. Auflage, Bonn : Addison-Wesley-Longman, 1997. - ISBN 3-89319-981-0

## ANLAGE

Anlage 1: Versuchsplanmatrix mit der Codierung der einzelnen Versuche, wie sie in den Bildern des Textteils benutzt wurde

Platten- bezeichnung	Beschichtungsparameter und Schichtaufbau			
	Ti-Strom, A	Gasdruck, Pa	BIAS- Spannung, V	Schichtaufbau
143	45	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
123	50	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
163	55	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
113	65	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
133	80	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
153	100	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
173	130	0,5	210	Ti/TiN/TiAlN
233	65	0,3	210	Ti/TiN/TiAlN
223	65	0,8	210	Ti/TiN/TiAlN
343	65	0,5	140	Ti/TiN/TiAlN
333	65	0,5	190	Ti/TiN/TiAlN
323	65	0,5	230	Ti/TiN/TiAlN
433	65	0,5	210	Ti/TiAlN
443	65	0,5	210	IN/Ti/TiN/TiAlN
423	65	0,5	210	Ti/TiCr/TiCrN/TiN/TiAlN
5000	45	0,3	140	Ti/TiN/TiAlN
5010	45	0,8	140	Ti/TiN/TiAlN
5100	130	0,3	140	Ti/TiN/TiAlN

Platten- bezeichnung	Beschichtungsparameter und Schichtaufbau			
	Ti-Strom, A	Gasdruck, Pa	BIAS- Spannung, V	Schichtaufbau
5110	130	0,8	140	Ti/TiN/TiAlN
5001	45	0,3	230	Ti/TiN/TiAlN
5011	45	0,8	230	Ti/TiN/TiAlN
5101	130	0,3	230	Ti/TiN/TiAlN
5111	130	0,8	230	Ti/TiN/TiAlN

## LEBENS LAUF

**Name, Vorname:** Sladkov, Dmitri

**Geburtsdatum:** 25. März 1974

**Geburtsort:** Moskau, Rußland

**Familienstand:** ledig

### **Abgeschlossene Schulbildung:**

1982 - 1992 Mittelschule Nr. 655, Moskau

### **Abgeschlossene Berufe:**

1998 Diplomingenieur (Magister), Moskauer Staatliche  
Technologische Universität „STANKIN“, Moskau

### **Berufliche Entwicklung:**

1992 - 1998 Student, Moskauer Staatliche  
Technologische Universität „STANKIN“,  
Moskau

1996 - 1997 Austauschstudent, IfW der Universität  
Stuttgart

seit 1998 Aspirant, Moskauer Staatliche  
Technologische Universität „STANKIN“,  
Moskau

2000 - 2001 DAAD-Stipendiat, IFQ der Otto-von-  
Guericke-Universität Magdeburg

seit 2002 Doktorand, IFQ der Otto-von-Guericke-  
Universität Magdeburg

### **Sprachkenntnisse:**

Russisch

Deutsch

Englisch (Grundkenntnisse)

Spanisch (Grundkenntnisse)