

Magnetische Beeinflussung von Pulsprozessen bei Vakuumbogenentladungen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von Dipl.-Ing. Enrico Hettkamp
geb. am 05.11.1970 in Weida

genehmigt durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann
Prof. Dr. rer. nat. habil. Achim Lunk

Promotionskolloquium am 20.06.2006

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energiesysteme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Ich möchte allen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir stets den erforderlichen Rückhalt gegeben hat und so mein Vorhaben unterstützte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H. Mecke, der am 28. Oktober 2004 plötzlich und unerwartet verstorben ist, danke ich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für die Betreuung meiner Arbeit und die vielen Anregungen, die sich aus gemeinsamen Gesprächen ergeben haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Lindemann danke ich, dass er die Betreuung meiner Arbeit übernommen hat und jederzeit für Fachdiskussionen zu Verfügung stand, um notwendige Impulse zum Fortgang und Abschluss der Arbeit zu geben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. A. Lunk danke ich für die Durchsicht meiner Arbeit und seine ergänzenden Anregungen.

Die experimentellen Arbeiten zur Dissertation wurden am Institut für Elektrische Energiesysteme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg durchgeführt.

An dieser Stelle sei allen Mitarbeitern und Studenten für die stets freundliche Unterstützung gedankt. Den Mitarbeitern der Werkstatt sei für die Umsetzung der notwendigen Versuchsanordnungen und für die Hilfe bei konstruktiven Problemen gedankt. Für ihre besondere Hilfe bin ich den Herren Dr.-Ing. Henning Fuchs und Dipl.-Ing. René Neumann zu Dank verpflichtet. Für die Unterstützung bei den Schichtuntersuchungen danke ich Frau Dipl.-Ing. Katharina Mecke und für nützliche Diskussionen und die Zusammenarbeit bei Veröffentlichungen danke ich Frau Dipl.-Phys. Karola Keutel.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

1	Einleitung	1
2	Zielstellung	3
3	Stand der Forschung	5
3.1	Allgemeine Grundlagen zur Vakuumbogenbeschichtung.....	5
3.2	Verfahren der PVD-Beschichtung.....	11
3.2.1	Random-Arc.....	14
3.2.2	Steered-Arc.....	15
3.2.3	Pulsed-Arc.....	15
3.3	Ausgewählte elektrische Parameter und deren Einfluss.....	17
3.3.1	Allgemeine Grundlagen.....	17
3.3.2	Einfluss der Pulsparameter auf die Eigenschaften des Plasmas.....	19
3.4	Ausgewählte magnetische Parameter und deren Einfluss.....	21
3.4.1	Begriffe und Definitionen.....	21
3.4.2	Robson-Drift und retrograde Bewegung.....	22
3.4.3	Einfluss von Magnetfeldern auf Plasma- und Schichteigenschaften.....	25
4	Experimentelle Basis	28
4.1	Versuchsaufbau.....	28

4.2	Verwendete Messmethoden und -technik.....	30
4.2.1	Ionenstrommessung.....	30
4.2.2	Härtemessung.....	31
4.2.3	Dropletbestimmung.....	32
4.2.4	Erfassung der Fußpunktbewegungen.....	33
4.2.5	Schichtdickenbestimmung.....	34
4.2.6	Magnetfeldmessungen und -simulationen.....	35
4.2.7	Massebestimmung der Targets.....	35
4.3	Vorüberlegungen zu Messgenauigkeit und Statistik.....	36
5	Beeinflussung des Lichtbogens beim modifizierten Puls-Arc- Verfahren durch statische Magnetfelder, eine Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren.....	39
5.1	Simulationen zum Magnetsystem.....	39
5.2	Prozessuntersuchungen mit der Verfahrenskombination von Steered- Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren.....	46
5.2.1	Fußpunktbewegung.....	46
5.2.2	Ionenstrom und Ionenstromverteilung.....	48
5.2.3	Beschichtungsrate und Schichtdickenverteilung.....	53
5.2.4	Schichthärte.....	56
5.2.5	Dropletmission.....	58
5.2.6	Targetausnutzung.....	60
6	Beeinflussung des Lichtbogens beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren durch veränderliche Magnetfelder.....	62
6.1	Simulationen zum Magnetspulensystem.....	62
6.2	Realisierung des Spulensystems und einer entsprechenden Versorgung...	65

6.3	Prozessuntersuchungen mit dem magnetisch gesteuerten modifizierten Puls-Arc-Verfahren.....	69
6.3.1	Fußpunktbewegung.....	69
6.3.2	Ionenstrom und Ionenstromverteilung.....	77
6.3.3	Beschichtungsrate und Schichtdickenverteilung.....	83
6.3.4	Schichthärte.....	91
6.3.5	Dropletmission.....	93
6.3.6	Targetausnutzung.....	97
7	Zusammenfassung	98
8	Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	103
	Anhang	115

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen:

α	Haftkoeffizient
γ	Koeffizient der Sekundärelektronenemission
Θ_B	Winkel zwischen Magnetfeldvektor und Katodenoberfläche
Φ_V	Driftwinkel
ϑ	Winkel zur Katodensenkrechten
μ	Massenerosionskoeffizient
ρ	Massendichte der aufwachsenden Schicht
$\sigma(x)$	Standardabweichung der Einzelmessung
$\langle x \rangle$	Erwartungswert von x
$\langle Z \rangle$	mittlerer Ladungszustand der Ionen
A	Fläche
B	magnetische Flussdichte
\vec{B}	Vektor der magnetischen Flussdichte
B_Y	y-Komponente der magnetischen Flussdichte
d, D	Durchmesser
d_{\max}	maximale Schichtdicke
d_s, h_s	Schichtdicke
\dot{d}_s	Beschichtungsrate
Er	reduced modulus
E_{kin}	kinetische Energie
\vec{E}_{ex}	externes elektrisches Feld
\vec{E}_j	elektrisches Feld aus Jetbewegung quer zum Magnetfeld
f_p	Pulsfrequenz
f^Z	Anteil der Ionen mit Ladungszustand Z
H	Schichthärte
i; I	elektrischer Strom
$i_{\text{arc}}, I_{\text{arc}}$	Bogenstrom
I_{arcMax}	Maximalwert des Bogenstromes
I_{arcMW}	Mittelwert des Bogenstromes
$I_{\text{arcpulsMW}}$	Mittelwert des Bogenpulsstromes
I_{DC}	Gleichstrom

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

I_G	Grundstrom
$i_{\text{Ion}}, I_{\text{Ion}}$	Ionenstrom
I_{ionMax}	Maximalwert des Ionenstromes
I_{ionMW}	Mittelwert des Ionenstromes
$I_{\text{ionpulsMW}}$	Mittelwert des Ionenpulsstromes
I_{mag}	Spulenstrom durch Magnetspule
I_P	Pulsstrom
j	Stromdichte
\vec{j}	Stromdichtevektor
j_i	Ionenstromdichte
k	Boltzmann-Konstante
\dot{m}	pro Zeiteinheit verdampftes Katodenmaterial
m_{at}	Masse der schichtbildenden Teilchen
m_i	Ionenmasse
n	Anzahl der Messwerte
n_i	Ionendichte
n_Z	Dichte der Ionen mit Ladungszahl z
p	Druck
r	Abstand vom Spotzentrum
R_K	Schleifkugelradius
r_{Spot}	Radius der Spotbahn
r_T	Targetradius
S	Sputterkoeffizient
s_{Puls}	Ausbreitungsweg der Fußpunkte während der Pulsphase
t	Zeit
t_{Besch}	Beschichtungszeit
t_E	Eindringtiefe in das Substrat
T_E	Gesamteindringtiefe der Kugel
T_e	Elektronentemperatur
t_{nach}	eingestellte Zeit nach dem Bogenstrompuls
t_P	Pulsdauer
T_{Si}	Siedetemperatur des Katodenmaterials
t_{vor}	eingestellte Zeit vor dem Bogenstrompuls
$u; U$	elektrische Spannung
U_{arc}	Lichtbogenspannung

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

U_{Bias}	Biasspannung
U_{H}	Hall-Spannung
U_{leer}	Leerlaufspannung
U_{Sonde}	Sondenspannung
v	Geschwindigkeit
\vec{v}_j	Jetgeschwindigkeit
v_{Kreis}	Geschwindigkeit der Fußpunkte auf der Kreisbahn
v_{Puls}	Geschwindigkeit der Fußpunkte während der Pulsphase
v_{Spot}	Geschwindigkeit der Fußpunkte (allgemein)
\vec{v}_r	Vektor der retrograden Geschwindigkeit
$W(x)$	Wahrscheinlichkeit, dass x als Messwert auftritt
x_i	Ionisierungsgrad von Plasmen; Messwert
\bar{x}	Mittelwert des Messwertes
\bar{Z}	mittlere Ionenladung

Abkürzungen:

CCD	charge coupled device
Cr	Chrom
CrN	Chromnitrid
DC	Gleichstrom
e^+	Elektronen
FEM	Finite-Elemente-Methode
HCA	high current arc
HF	Hochfrequenz
HV	Vickershärte
IGBT	insulated gate bipolar transistor
MAGC	Metall-Aktivgas (-Schweißen), gesteuert
Me	Atome des Katodenmaterials
Me^+	Ionen des Katodenmaterials
MSG	Metall-Schutzgas (-Schweißen)
PVD	physical vapor deposition
REM	Rasterelektronenmikroskop
TiAl	Titan-Aluminium
TiAlN	Titan-Aluminiumnitrid
Ti	Titan
TiN	Titannitrid

1 Einleitung

Die Erzeugung einer Lichtbogenentladung im Vakuum ist mit Vorstellungen und Erfindungen verknüpft, die schon im 15. Jahrhundert ihren Ursprung haben.

W. R. Grove war 1852 der erste, der sich mit einem Effekt beschäftigte, der später als „Sputtern“ bekannt wurde [001]. Dabei löste er Atome aus einem Material indem er die Oberfläche mit positiven Ionen beschoss. Schon 1839 beschrieb R. Hare einen Lichtbogenofen, um unter kontrollierten atmosphärischen Bedingungen eine Metallschmelze zu erzeugen. M. Faraday verdampfte 1857 als erster ein Metall zum Zwecke der Beschichtung in einem Vakuum. Er zerstäubte dabei einen Gold-Draht im Vakuum mit Hilfe einer „Leyden-Batterie“ in der Nähe eines Glases, um dieses zu beschichten. 1884 meldete T. A. Edison ein Patent an mit dem Titel „Art of Plating One Material with Another“ [002].

1954 stellte Bradley Kohlenstoff-Schichten mit einer spitzen, länglichen Kohlenstoffkatode als Plasmaquelle her. 1964 folgten Untersuchungen verschiedener Wissenschaftler bezüglich des Katodenmaterials. Neben verschiedenen Metallen kamen auch deren Schmelzen zum Einsatz. Die 1972 von Morley und Smith genutzte Hohlkatode ermöglichte erstmals eine erhebliche Steigerung der Beschichtungsraten.

Mitte 1970 beschäftigten sich Wissenschaftler in der ehemaligen Sowjetunion mit verschiedenen Verdampferkonstruktionen und Möglichkeiten, die Fußpunkte auf der Targetoberfläche zu beeinflussen. Patente von A. A. Snaper (magnetische Beeinflussung, 1974) und L. P. Sablev (Katodenkonstruktion, 1974) zeigen Stationen dieser Entwicklung. Durch den Einsatz von Magnetfeldern wurde die Oberflächenqualität verbessert, da man die Entstehung von Droplets verringern konnte. Andere Bemühungen, die Droplets in der industriellen Beschichtung zu beseitigen, unternahmen Anfang 1990 die „Royal Australian Mint“ durch den Einsatz der magnetisch gefilterten Lichtbogenbeschichtung für ihre TiN-Schichten.

Die Beschichtung von Bauteilen und Werkzeugen mit funktionellen oder dekorativen Dünnschichten mittels PVD-Verfahren (physical vapor deposition) ist heute industriell weit verbreitet. Bei der Herstellung hochqualitativer Schichten und Schichtsysteme hat sich die Vakuumbogenbeschichtung etabliert.

So erhöht eine Beschichtung die Standzeiten von spanabhebenden Werkzeugen um ein Vielfaches. Auch die Beschichtung von Umformwerkzeugen eröffnet zunehmend neue Möglichkeiten, bestehende Umformprozesse zu optimieren und Bauteile zu fertigen, die ohne beschichtete Werkzeuge nicht ohne einen hohen Aufwand hergestellt werden

könnten. Der wirtschaftliche Faktor besitzt, wie in allen Industriezweigen, eine entscheidende Bedeutung bei der Anwendung der Beschichtungstechnologien in einem sich ständig erweiternden Spektrum.

Neben den klassischen Anwendungsgebieten werden zunehmend neue Bereiche für die Oberflächentechnik erschlossen. Zu nennen wären die Nutzung der verschiedenen Verfahren im mikrotechnischen und sensorischen Bereichen. Es ergeben sich dabei völlig neue Möglichkeiten, z. B. für die Herstellung von Sensoren, die auf anderem Wege nicht realisierbar wären.

Daneben gibt es aber auch Probleme in der Anwendung, die durch Abwandlung vorhandener Verfahren und der Schaffung neuer Technologien gelöst werden. So stellt z. B. die Trenchmetallisierung für die Halbleiterindustrie eine wichtige Technologie dar, die auf immer kleineren Strukturen eingesetzt werden soll.

Es ist also ersichtlich, dass die Oberflächentechnologie als eine Schlüsseltechnologie angesehen wird. Ihr Einsatz ist nicht mehr nur auf einzelne Branchen beschränkt. Auch kleine und mittelständische Unternehmen sind entweder Kunden oder stellen Verfahren und Geräte zur Verfügung. Der wirtschaftliche Aspekt und auch die Konkurrenzfähigkeit treiben dabei die Entwicklung voran.

2 Zielstellung

Gegenstand dieser Arbeit ist das modifizierte Puls-Arc-Verfahren. Dieses Verfahren zeichnet sich durch die Überlagerung einer Grund- mit einer Impulsstromphase aus. Dieses in ähnlicher Form vom Impulsschweißen bekannte Verfahren hat gegenüber den diskontinuierlichen Puls-Arc-Prozessen den Vorteil, unabhängig von speziellen Zündeinrichtungen mit in weiten Grenzen frei wählbaren Pulsstromparametern (Pulsform, Maximalstrom, Pulsdauer, Frequenz) arbeiten zu können. Der Grundstrom hat dabei die Aufgabe, die Lichtbogenentladung zwischen den Stromimpulsen aufrecht zu erhalten. Die eigentliche Wirkung auf den Prozess wird in den Pulsphasen erzielt.

In der Arbeit steht die magnetische Beeinflussung des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens im Mittelpunkt. Dabei sollen statische und veränderliche Magnetfelder betrachtet werden. Prinzipiell handelt es sich um eine Verfahrenskombination von Steered-Arc-Verfahren und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren. Dem Vorteil der geringeren Droplet-emission stehen beim industriell etablierten Steered-Arc-Prozess im Vergleich zum Random-Arc die Nachteile, wie verringerter Ionenstrom und reduzierte Schichtbildungsrate gegenüber. Die Eigenschaften des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens führen neben der verbesserten Targetausnutzung auch zur Erhöhung des mittleren Ionenstromes am Substrat und damit zur Erhöhung der Beschichtungsrate. Die immer noch zu hohe Droplet-emission im Vergleich zum Steered-Arc und eine nicht definierbare Startposition der Fußpunkte am Impulsbeginn sind als Nachteile zu sehen. Es stellt sich so die Frage, ob mit einer Verfahrenskombination die bekannten positiven Eigenschaften des Steered-Arc-Verfahrens und die des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens miteinander verbunden werden können.

Neben der Verwendung eines statischen Magnetfeldes soll ebenfalls ein veränderliches, dem Bogenstrom angepasstes Magnetfeld untersucht werden. Dem modifizierten Puls-Arc-Verfahren liegen zwei unterschiedliche Prozessphasen zu Grunde. Durch ein veränderliches Magnetfeld ist es im Gegensatz zur Verwendung von Permanentmagneten möglich, auf die Grund- und die Impulsstromphase des Verfahrens gesondert einzuwirken. Während der Grundstromphase wird das magnetische Feld benötigt, um eine definierte Bahn für die Fußpunkte einzuhalten. In der Impulsstromphase wirkt es sich jedoch negativ auf die Ausbreitung der Fußpunkte aus. Die Fußpunkte überstreichen dann eine kleinere Fläche, was sich für einen gleichmäßigen Abtrag des Targets und

eine hohe Beschichtungsrate ungünstig auswirkt. Um eine ungehinderte Ausbreitung der Fußpunkte zu gewährleisten, ist es denkbar, das Magnetfeld zu verändern, um den Fußpunkten mehr Bewegungsspielraum zu geben. Nach jedem Impuls wird das Magnetfeld genutzt, um für den darauf folgenden Impuls die gleichen Ausgangsbedingungen zu schaffen, indem die Fußpunkte auf eine definierte Bahn gezwungen werden. Ohne Magnetfeld ist in der Grundstromphase z. B. nicht sichergestellt, dass der Fußpunkt sich nicht nahe dem Rand des Targets bewegt und durch einen folgenden Impuls darüber hinaus gedrängt wird, um zu verlöschen. Diese Instabilitäten gilt es zu vermeiden. Die Steuerung eines externen Magnetfeldes während der Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifizierten Puls-Arc-Prozess ermöglicht einer Verfahrenskombination neue Freiheitsgrade.

Bei der Vakuumbogenbeschichtung ist für die Ausbildung des Substrat-Schicht-Interfaces und der eigentlichen Hartstoffschicht der Ionenstrom von entscheidender Bedeutung. In früheren Untersuchungen wurden durch Nutzung der Freiheitsgrade einer gepulsten Bogenstromversorgung der Ionenstrom in seinem zeitlichen Verlauf und seinen Absolutwerten derart gesteuert, dass verbesserte Schichteigenschaften (Härte, Haftfestigkeit, Struktur, Oberflächenrauigkeit) erreicht wurden. Dem Verfahren lag die Idee zu Grunde, ähnlich wie beim stromgeregelten MAGC-Schweißen oder den Stufenpulsen beim MSG-Impulsschweißen, einzelne, während eines Stromimpulses ablaufende Prozesse, gezielt steuern zu können. So bietet der Puls-Modus die Möglichkeit, direkt einzelne elektrischen Parameter (z. B. Flankensteilheit, Pulsfrequenz und Pulsdauer beim Pulsstrom) zu verändern. Auch für diesen Fall soll der Einfluss eines steuerbaren externen Magnetfeldes untersucht werden.

Diese Arbeit soll zu einem besseren Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge zwischen den elektrischen und magnetischen Parametern und den resultierenden Plasmaeigenschaften und Schichten beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren beitragen.

3 Stand der Forschung

3.1 Allgemeine Grundlagen zur Vakuumbogenbeschichtung

Die Vakuumbogenentladung ist eine Entladungsform, welche in Gasen oder Dämpfen unterhalb eines Arbeitsdruckes von etwa 10^3 Pa brennt, wobei Ströme und Spannungen im Bereich von einigen Ampere bis zu einigen Kiloampere bzw. von etwa 10 bis zu einigen zehn Volt auftreten [003]. Von ihrer Charakteristik her schließt sich die Bogenentladung an die Glimmentladung an (Abb. 3-1).

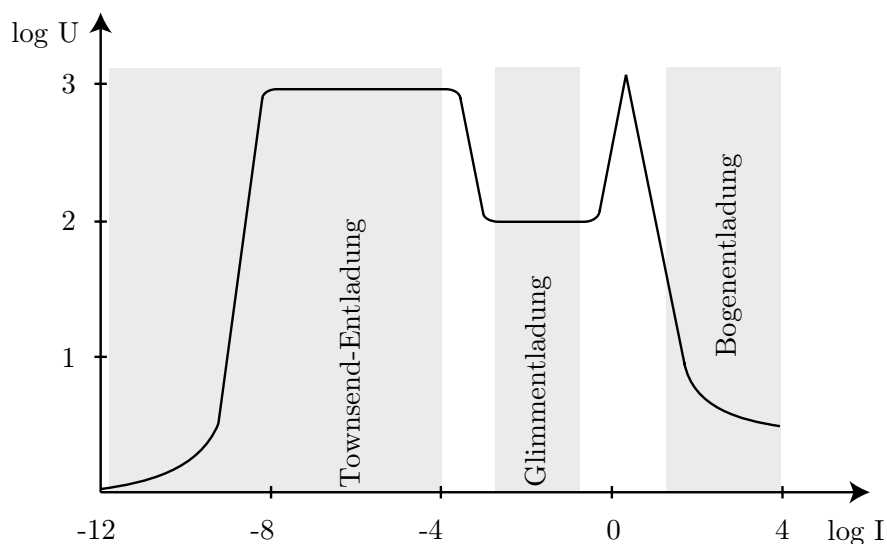


Abb. 3-1 Einteilung der verschiedenen Entladungen nach ihrer Charakteristik

Das zu beobachtende Absinken der Spannung bei einer Bogenentladung im Vergleich zu einer Glimmentladung ist ein Kennzeichen für eine effektive Ladungsträgergeneration an der Katode. Unter normalen Bedingungen (Druck) kann man Lichtbögen mit Hilfe von Glühkathoden in einem Arbeitsgas betreiben. Beim Vakuumlichtbogen hingegen werden die Ladungsträger durch die Vorgänge an der Kathodenoberfläche bereitgestellt. Durch ihren hohen Energieeintrag in die Oberfläche entstehen lokale Verflüssigungen bzw. Verdampfungen. Die Entladung brennt also im Dampf des Kathodenmaterials, ohne dass ein Arbeitsgas notwendig ist.

Es soll noch erwähnt werden, dass es auch möglich ist, durch entsprechende Umgebungsbedingungen einen anodischen Vakuumbogen zu betreiben [004]. In den weiteren Ausführungen steht jedoch der katodische Vakuumbogen im Mittelpunkt.

Die Verdampfung und die Ionisierung des Katodenmaterials werden durch die Katodenbrennflecken, auch „Spots“ genannt, bestimmt. Sie führen ohne äußere Beeinflussung eine stochastische Bewegung auf der Katodenoberfläche aus. In Abb. 3-2 sind die Modellvorstellungen nach Martin [005] abgebildet.

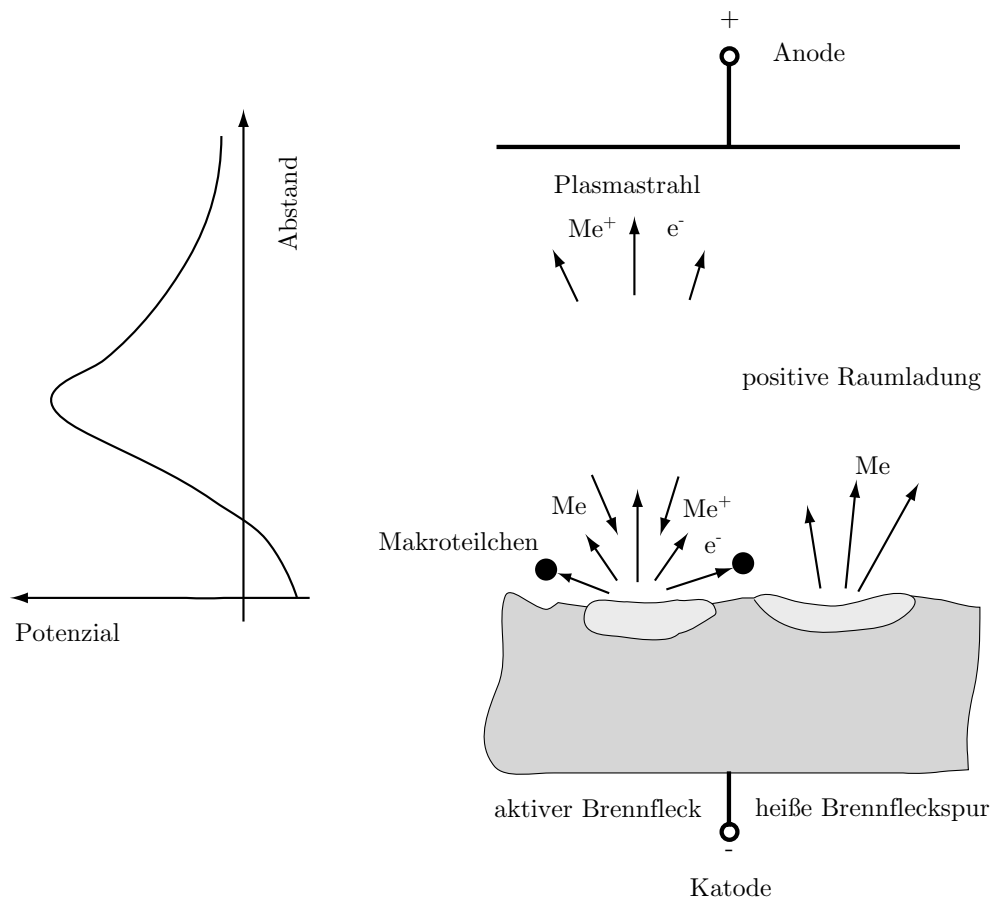


Abb. 3-2 „Potential hump“-Modell einer Vakuumbogenentladung und des angenommenen Potenzialverlaufes nach Martin [005]
(*Me...Atome des Katodenmaterials; Me⁺...Ionen des Katodenmaterials*)

Zu den Vorgängen zwischen den Spots und der Katodenoberfläche wurden einige Modellvorstellungen entwickelt. So beschreibt Jüttner [006], dass es durch Mikrospitzen an der Oberfläche zu einer intensiven Feldelektronenemission kommt, die auf Grund der geringen Größe dieser Spitze sofort zu einer Thermoemission führt. Unter einer zunehmenden Elektronenemission und steigendem Ionenbeschuss geht die Verdampfung der Mikrospitze in das Aufschmelzen eines benachbarten Gebietes über. Durch den Plasmadruck wird das geschmolzene Material an den Rand des entstandenen Kraters gedrückt und bildet dabei erneut Mikrospitzen aus. Neben der Entstehung von Mi-

krospitzen lösen sich schmelzflüssige Partikel ab. Diese Makroteilchen, auch Droplets genannt, führen dann im späteren Verlauf zu einer Verminderung der Schichtqualität. An den neu entstandenen Mikrospitzen wiederholt sich der gesamte Vorgang. Der Kathodenbrennfleck springt somit in etwa um die Strecke, die der Kraterradius vorgibt. Die Anode hat dabei die Funktion, die emittierten Elektronen aufzufangen. Der entstehende Elektronenstrom ist weitgehend homogen über deren Oberfläche verteilt.

Die Spots besitzen einen Durchmesser von nur 1 ... 10 μm und daher tritt eine sehr hohe Stromdichte im Bereich von $10^6 \dots 10^7 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ [003] auf. Bei Vorhandensein reiner Metalloberflächen als Katode ist die Anzahl der gleichzeitig existierenden Spots eine Funktion des Bogenstromes. Je nach Material liegt der Bogenstrom für die Existenz eines einzelnen Spots im Bereich von 30 bis 100 A [003]. Vielfache dieses Wertes für den Bogenstrom führen zu einer Teilung der Spots in eine entsprechende Anzahl von Subspots.

Jeder Spot produziert ein hoch ionisiertes Plasma mit einem Ionenstromanteil von 7 bis 12 % des Bogenstromes [007]. Der Ionisierungsgrad des Plasmas hängt dabei von den Eigenschaften des Katodenmaterials ab. So wird für hochschmelzende Metalle und für Kohlenstoff eine Ionisierung von nahezu 100 % erreicht. Abb. 3-3 zeigt einige Beispiele dazu. Die Ionen können auch Mehrfachladungen besitzen.

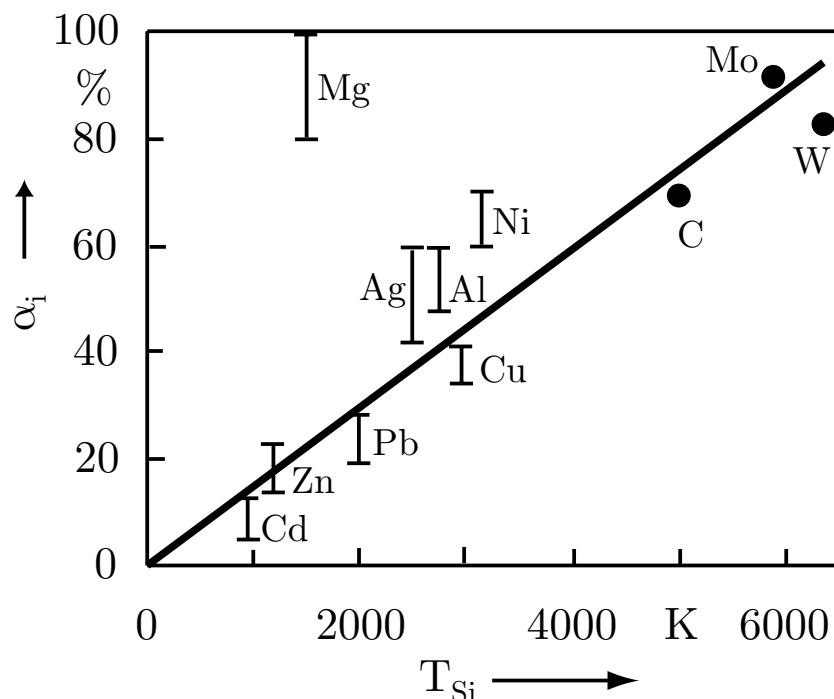


Abb. 3-3 Ionisierungsgrad α_i von Plasmen in Abhängigkeit von der Siedetemperatur des Katodenmaterials T_{Si} [003]

Auftretende Elektronentemperaturen liegen im Bereich von einigen eV [008, 009] ohne signifikante Beeinflussung durch Abstand oder Bogenstrom. Die Elektronendichten bewegen sich im Bereich von $10^{16} \dots 10^{17} \text{ m}^{-3}$ [008]. Der hohe Ionisierungsgrad und die dabei von der Katode weg gerichtete Plasmaströmung der Vakuumbogenentladung macht sie gerade für Beschichtungszwecke sehr geeignet. Die Plasmaströmung erreicht dabei Geschwindigkeiten von $10^4 \dots 10^5 \text{ m/s}$ [010]. Beschleunigt werden die Elektronen durch einen vor der Entladung existierenden Potenzialhügel (siehe auch Abb. 3-2). Die Wechselwirkung des Plasmas mit dem Arbeitsgas ist durch folgende Prozesse gekennzeichnet:

1. Die Ionenenergie verringert sich durch Zusammenstöße der Gasteilchen des Arbeitsgases mit den beschleunigten Ionen [011].
2. Die Streuung der Ionen beeinflusst die Ausbreitung der geladenen Teilchen, was zu einer Verbesserung der Schichtdickenverteilung führen kann [011].
3. Ionisation, Rekombination und Ladungsaustauschprozesse treten auf [012].

Bei Arbeitsdrücken unterhalb von 10^{-2} Pa treten zwischen den Teilchen des Plasmas und des Arbeitsgases kaum noch Zusammenstöße auf [003]. In der Tab. 3-1 sind für einige Materialien ausgewählte Plasmaeigenschaften aufgeführt.

Tab. 3-1 Plasmaeigenschaften ausgewählter Materialien im Vakuumbogen [013]

Symbol	Kernladungszahl	Ionen- geschwindigkeit [10^4 m/s]	Kinetische Energie [eV]	Mittlere Anzahl der Ladungen	Elektronen- temperatur [eV]
C	6	2,97	54	1	2
Al	13	2,76	106	1,7	3,1
Ti	22	2,22	122	2,1	3,2
Cr	24	1,94	101	2,1	3,4
Cu	29	1,28	54	2	3,5
Mo	42	1,74	151	3,1	4,5

Das Plasma als Werkzeug zur Verdampfung des Katodenmaterials führt zu einigen verfahrensspezifischen Kenngrößen. Eine wichtige Position nimmt dabei die Massenerosionsrate bzw. die Beschichtungsrate ein.

Für einen Gleichstrombogen wurde ein linearer Zusammenhang zwischen dem pro Zeiteinheit erodierten Katodenmaterial und dem Bogenstrom experimentell im Bereich von $80 \text{ A} < I_{\text{arc}} < 250 \text{ A}$ ermittelt [003].

$$\dot{m} = \mu * I_{\text{arc}} \quad (3-1)$$

(\dot{m} ... pro Zeiteinheit verdampftes Katodenmaterial; μ ... Massenerosionskoeffizient; I_{arc} ... Bogenstrom)

Neben der Abhängigkeit der Massenerosionsrate vom Katodenmaterial besteht auch ein Zusammenhang mit der Oberflächentemperatur der Katode und dem Druck des umgebenden Arbeitsgases. Abb. 3-4 zeigt experimentell ermittelte Werte in Abhängigkeit vom Arbeitsdruck. An dieser Stelle wird der lineare Zusammenhang zwischen dem Bogenstrom und dem pro Zeiteinheit erodiertem Katodenmaterial nochmals deutlich. Bei Messungen zur Massenerosionsrate ist noch zu bemerken, dass der zur Katode zurückfließende Teilchenstrom (Abb. 3-2) nicht berücksichtigt werden kann, da er sich einer direkten Messung entzieht.

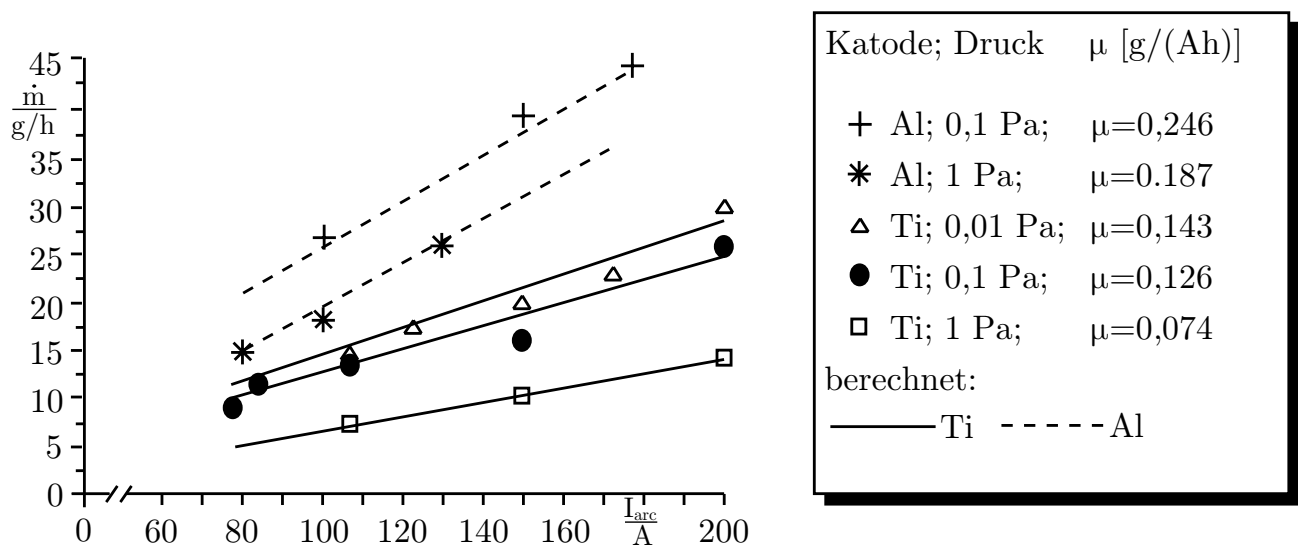


Abb. 3-4 Experimentell von Ellrodt ermittelte Erosionsraten für den DC-Arc-Prozess [014]

Neben der Massenerosionsrate besitzt die Beschichtungsrate eine große Bedeutung. Diese Größe ist direkt mit dem von der Katode zum Substrat fließenden Ionenstrom verknüpft. Meist erfolgt die Beschichtung des Substrates zusätzlich mit einer negativen

Vorspannung, der Biasspannung, am Substrat. Für diesen Fall zeigt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Beschichtungsrate bzw. der Aufwachsrate \dot{d}_s und der zu messenden Ionenstromdichte j_s . Die folgende Gleichung zeigt die grundlegenden Zusammenhänge [015]:

$$\dot{d}_s = \frac{j_s * (\alpha - S) * m_{at}}{(1 + \gamma) * e < Z > \rho * x_i} \quad (3-2)$$

(α ... Haftkoeffizient, S ... Sputterkoeffizient, m_{at} ... Masse der schichtbildenden Teilchen, γ ... Koeffizient der Sekundärelektronenemission, $< Z >$... mittlerer Ladungszustand der Ionen, ρ ... Massendichte der aufwachsenden Schicht, x_i ... Ionisierungsgrad des Plasmas)

Für reaktive Prozesse gilt die Gleichung jedoch nicht, da aus dem Arbeitsgas Teilchen in die Schicht eingebaut werden und die Größen m_{at} , $< Z >$ und ρ vom Reaktivgasdruck abhängig sind.

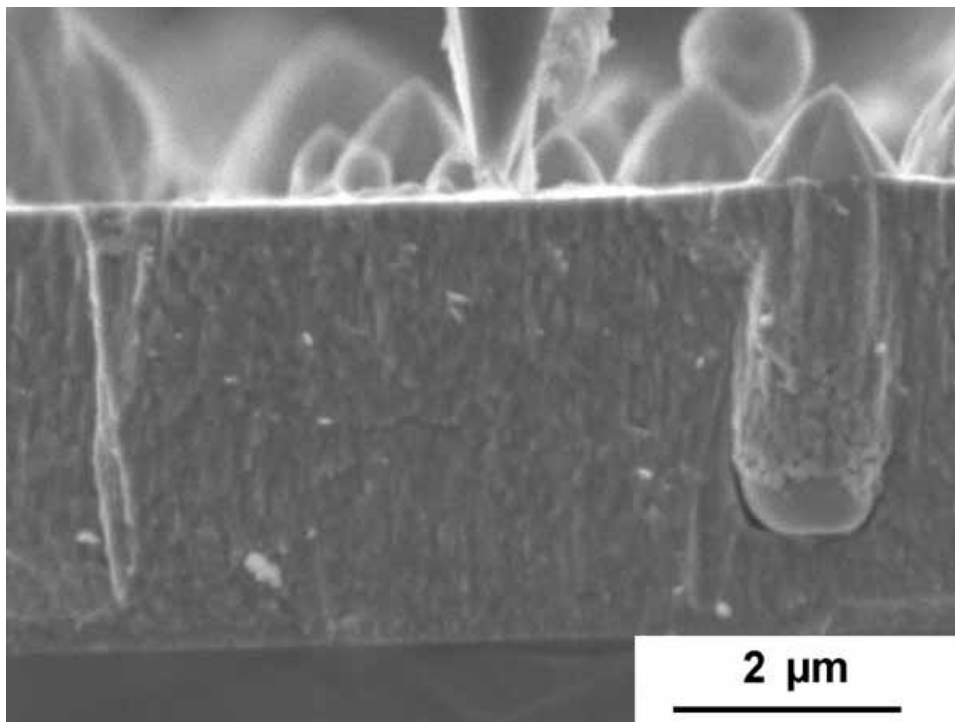


Abb. 3-5 REM-Aufnahme einer stark durch Droplets verunreinigten Beschichtung

Bei der Beschreibung der Vorgänge am Katodenbrennfleck wurde bereits auf die Entstehung von Makroteilchen hingewiesen. Diese sogenannten Droplets entstehen aus dem Erosionskrater heraus als schmelzflüssige Tropfen. Sie haben den entscheidenden Nachteil, dass sie ohne Gegenmaßnahmen in die entstehende Schicht eingebaut werden. Dies kann sich je nach Anwendungsbereich der Beschichtung negativ auswirken.

Abb. 3-5 zeigt eine Beschichtung, die durch Droplets verunreinigt worden ist. Rechts im Bild ist ein in die Schicht eingebautes Droplet zu erkennen. Droplets haben Größen von bis zu einigen 10 Mikrometern und ihre Entstehung ist von verschiedenen Parametern abhängig. So bestimmen z. B. das Katodenmaterial und die Entladungsbedingungen die Größe, Anzahl und Verteilung von Droplets. Gerade ihre Entstehung bzw. Anlagerung am Substrat zu verhindern, hat in der Vakuumbogenbeschichtung zu einigen speziellen Techniken geführt. Darauf soll unter anderem im folgenden Abschnitt näher eingegangen werden.

3.2 Verfahren der PVD-Beschichtung

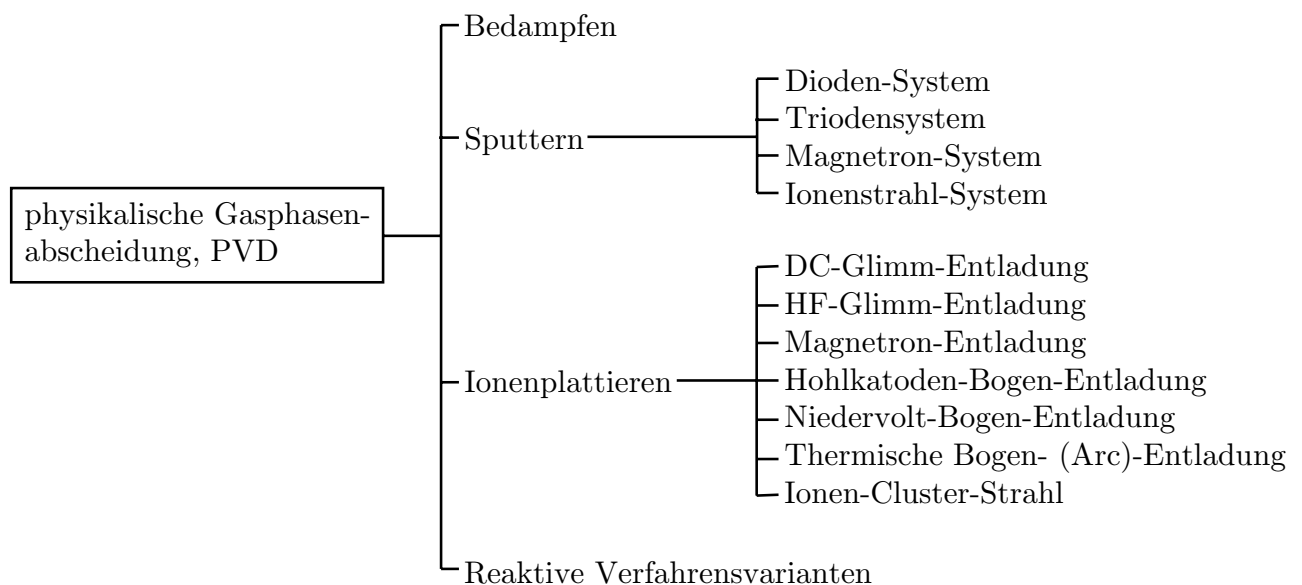


Abb. 3-6 Übersicht zu PVD-Beschichtungsverfahren [017]

Die PVD-Beschichtungsverfahren (**physical vapor deposition**) sind Prozesse, die der Herstellung dünner Schichten dienen [016]. Ein Merkmal dieser Verfahren ist, dass das für die Beschichtung benötigte Material durch unterschiedliche Verfahren in die Gasphase überführt wird.

Beim Bedampfen wird das Katodenmaterial direkt oder indirekt durch eine elektrische Widerstandserwärmung oder durch Elektronenstrahlbeschuss geschmolzen und verdampft. Das Sputtern hingegen ist durch das Abtragen von Atomen oder Atomgruppen aus einer Festkörperoberfläche durch Ionenbeschuss gekennzeichnet. Beim Ionenplattieren kommt es durch gezieltes Einbringen von Ionen in die Oberfläche eines Substrates zu Veränderungen in den Eigenschaften einer dünnen Oberflächenschicht. Wird zusätzlich mit einem Reaktivgas im Zusammenhang mit den drei genannten Verfahrensvarianten gearbeitet, so spricht man vom reaktiven Verdampfen bzw. Sputtern. Darüber hinaus haben die Kombinationen von einzelnen Verfahren zur Schaffung neuer Verfahrensvarianten geführt.

Die Prozesse, die Gegenstand dieser Arbeit sind, werden in die Gruppe der reaktiven thermischen Bogen- (Arc-) Beschichtung eingeordnet. Der Aufbau der Beschichtungsanlage ist für diese Prozesse vergleichbar. Lediglich die Art der Energieversorgung des Plasmas bzw. die Anwendung von Magnetfeldern unterscheidet sie.

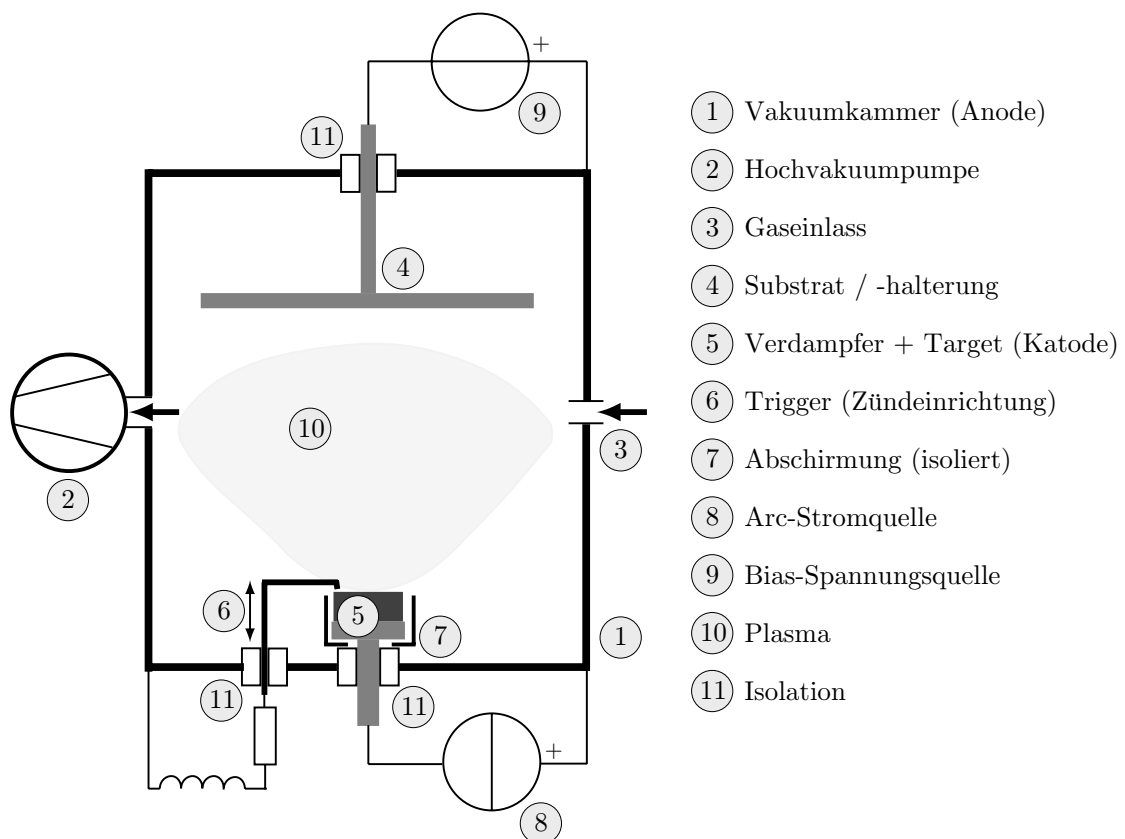


Abb. 3-7 *Prinzipieller Aufbau einer PVD-Beschichtungsanlage mit einer Vakuumbogen-Quelle*

Den prinzipiellen Aufbau der Beschichtungsanlage verdeutlicht Abb. 3-7. Das angeführte Beispiel der Anlage lässt sich je nach Prozessführung modifizieren. So kommen für Beschichtungen mit unterschiedlichen Materialien oftmals mehrere Verdampfer zum Einsatz. Es ist aber auch möglich, segmentierte Targets [020] für diese Aufgabe zu verwenden. Um während des Prozesses das gezielte Verdampfen eines Materials zu gewährleisten, können z. B. Abschirmungen die gewünschten Erosionsgebiete festlegen [021] oder Magnetfelder für eine Festlegung des Erosionsgebietes zum Einsatz gebracht werden [022, 023, 024].

Die Arc-Verdampfer beruhen prinzipiell auf zwei Grundformen. Diese in Abb. 3-8 dargestellten Formen unterscheiden sich in erster Linie durch ihre Anode.

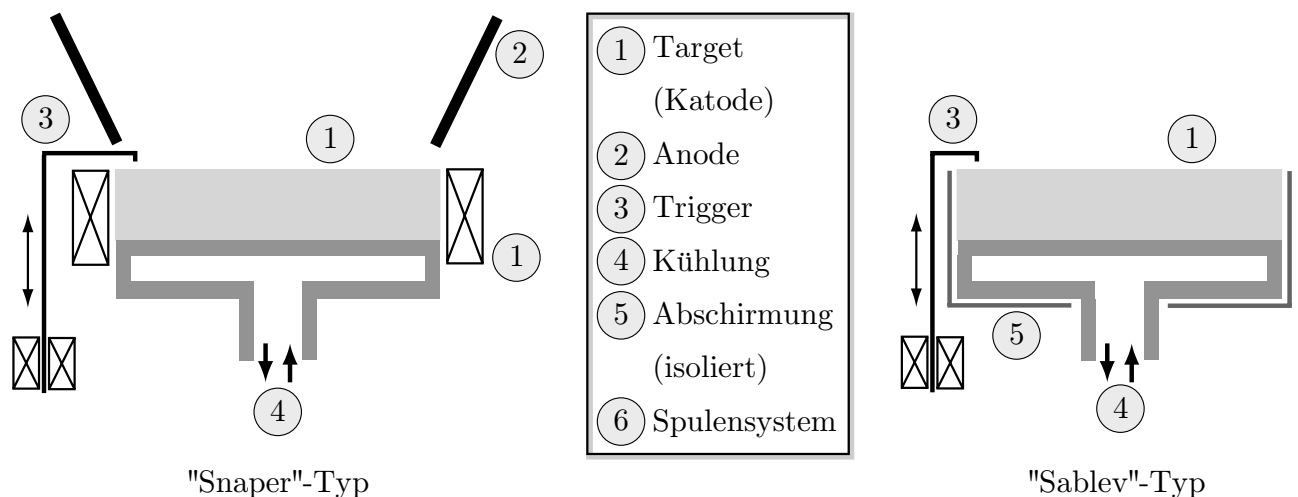


Abb. 3-8 Grundformen von Arc-Verdampfern [018, 019]

Während beim „Snaper“-Typ [018] eine eigens dafür angeordnete Anode zum Einsatz kommt, ist die Anode des „Sablev“-Typs [019] die Vakuumkammer selbst. Ein weiterer Unterschied ist in der Art der Begrenzung des Erosionsgebietes zu finden. Für den „Snaper“-Typ sorgt ein Magnetsystem dafür, dass die Spots die Targetoberfläche nicht verlassen können. Beim „Sablev“-Typ übernimmt eine elektrisch potenzialfreie Abschirmung diese Aufgabe.

Eine andere wichtige Einrichtung ist der Trigger. Er sorgt für die Zündung des Plasmas durch die Erzeugung von Ladungsträgern. Eine einfache Variante ist die mechanische Triggerung. Dabei wird auf der Katodenoberfläche ein elektrischer Kurzschluss erzeugt. Das verdampfende Material stellt so die notwendigen Ladungsträger für die Zündung eines Lichtbogens bereit [018, 019].

Bei diskontinuierlichen Prozessen muss die Triggereinrichtung jede Entladung neu

initiieren. Eine Möglichkeit dazu ist die Zündung durch einen auf die Katodenoberfläche fokussierten Laserstrahl [025, 026]. Bei dieser Methode besteht die Möglichkeit, durch die Steuerung des Zündortes den Katodenabtrag zu beeinflussen. Eine andere Triggereinrichtung bedient sich eines Hochspannungsimpulses. Anwendung findet diese Methode z. B. beim HCA-Verfahren (**high current arc**), bei dem sich die Zündelektrode in der Targetmitte befindet [027, 028, 029].

Neben den konstruktiven Bedingungen an der Katode stellt die Stromversorgung eine weitere Komponente dar. Grundsätzlich ist es möglich, sowohl mit Gleichstrom als auch mit gepulstem Bogenstrom zu arbeiten. Der Einsatz der verschiedenen Stromquellen richtet sich dabei nach den erforderlichen Prozessbedingungen für die Erzeugung von Schichten mit bestimmten Eigenschaften. So ist der Einsatz von gepulsten Verfahren u. a. mit einer Erhöhung der Beschichtungsrate und einer Veränderung der Plasmaeigenschaften verbunden [030, 031, 032]. Im Folgenden wird auf die Besonderheiten der Arc-Verfahrensvarianten eingegangen.

3.2.1 Random-Arc

Der Random-Arc (engl.: random = zufällig) basiert auf einer Gleichstromentladung (DC-Arc), die zu einer stochastischen Bewegung der Spots auf der Katodenoberfläche führt. Es werden keine Maßnahmen zur Beeinflussung der Spots auf der Katodenober-

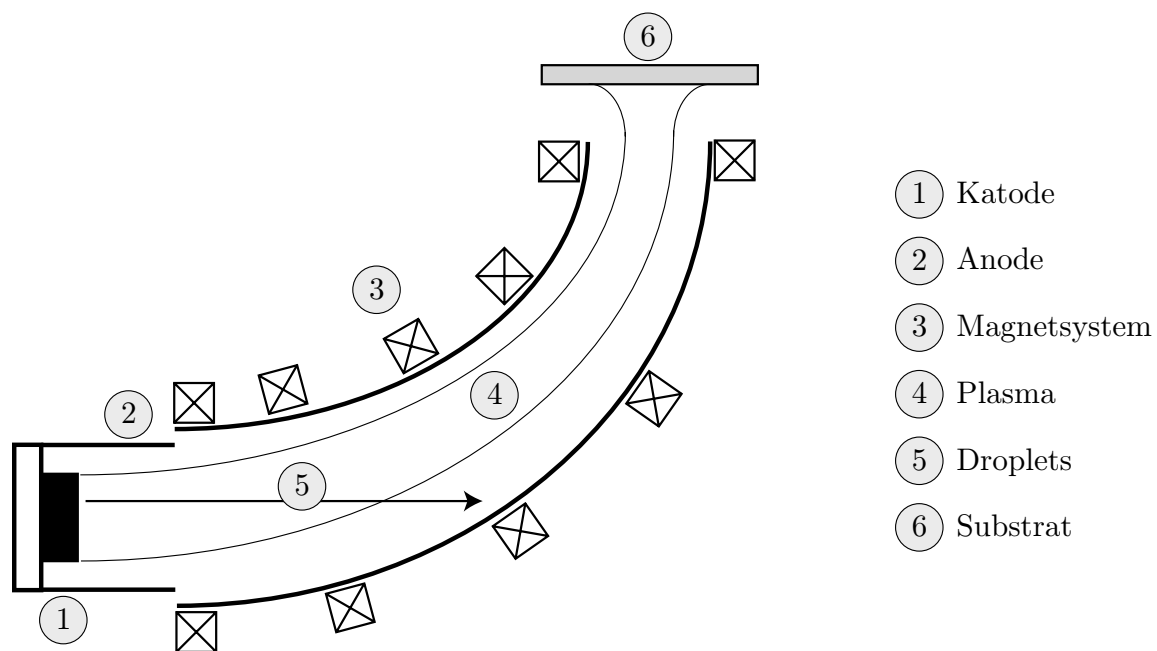


Abb. 3-9 Prinzipieller Aufbau eines Filtered-Arc-Verdampfers

fläche getroffen. Die Bewegung wird im Wesentlichen durch die Eigendynamik und daraus resultierende Kraftwirkungen, thermische Einflüsse, die Verhältnisse auf der Katodenoberfläche und elektrische Anschlussbedingungen beeinflusst.

Die verwendeten Prozessparameter liegen für den Bogenstrom bei 60 ... 100 A und einer Brennspannung von 15 ... 25 V. Der Arbeitsdruck beträgt zwischen 0,1 und 10 Pa [014].

Der relativ hohe Dropletanteil ist ein Nachteil des Prozesses. Zur Verringerung des Dropletanteiles beim Random-Arc wurden Verfahrensvarianten entwickelt. Eine Variante stellt der Filtered-Arc dar. Das Plasma wird durch ein Magnetfeld abgelenkt und dadurch von den im Plasma transportierten neutralen Droplets getrennt (Abb. 3-9). Resultierend ist die Abscheidung dropletfreier Schichten möglich. Diese Vorgehensweise führt jedoch zu einer Verringerung der Beschichtungsrate durch eine begrenzte Filtertransmission.

3.2.2 Steered-Arc

Bei Einsatz von externen Magnetfeldern in Katodennähe bei einem DC-Arc wird die Bewegung des Brennflecks in eine bevorzugte Richtung konzentriert [003, 033]. Dieses Verfahren wird als Steered-Arc-Verfahren bezeichnet [034, 035] und seit einigen Jahren industriell eingesetzt. Es wird dabei zwischen schwach und stark gesteuerten Bögen unterschieden [014, 036]. Auf die Vorgänge zur Spotbeeinflussung im Magnetfeld wird im Abschnitt 3.4 eingegangen.

Für die Schichteigenschaften bedeutet die Anwendung von Magnetfeldern einige entscheidende Verbesserungen. So wird z. B. von der Erhöhung der Schichthärte und der Eigenspannung berichtet [037]. Ein weiterer wesentlicher Vorteil besteht in der Verringerung der Dropletmission [038]. Dies wird durch eine prozessbedingte, höhere Spotgeschwindigkeit erklärt. Die Verweildauer der Spots an einer Stelle wird verkürzt und eine lokale Kraterbildung minimiert. Aus den kleineren Kratern ergibt sich die Verringerung der Dropletanzahl und der Dropletgröße.

Durch die veränderte Emissionscharakteristik kommt es allerdings auch zu einer Verringerung der Beschichtungsrate [038]. In diesem Zusammenhang ist auch von einer Verringerung des Ionenstromanteiles auszugehen, was in [038] bestätigt wird.

3.2.3 Pulsed-Arc

Das wesentliche Merkmal dieses Verfahrens ist die Bogenstromführung. Bei Random-

und Steered-Arc-Verfahren wird bisher nur ein kontinuierlicher Gleichstrom verwendet. Im Gegensatz dazu werden bei gepulsten Entladungen sehr kurze (wenige $10 \mu\text{s}$... wenige 10 ms) und stromstarke ($1 \dots 4 \text{ kA}$) Impulse eingesetzt, die bei Bedarf mit einer bestimmten Frequenz oder mit vorgegebener Anzahl wiederholt werden [039, 040, 041]. Da die Entladung zeitlich unterbrochen ist, muss bei jedem Stromimpuls der Bogen neu gezündet werden. Das kann durch eine mechanische Triggereinrichtung [039], durch einen energiereichen Laserimpuls auf die Katodenoberfläche [040] oder bei in der Katodenmitte eingebauter Triggerelektrode durch einen Hochspannungsimpuls erfolgen [041].

Die Prozessmodifikation durch Pulsung des Bogenstromes hat sowohl Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften als auch auf die Struktur der abgeschiedenen Schichten. In [042] werden Ergebnisse vorgestellt, die ein orientiertes Schichtwachstum und eine gute Schichtstrukturierung zeigen.

Im Gegensatz zu den diskontinuierlichen Verfahren arbeitet das modifizierte Puls-Arc-Verfahren [014] mit der Überlagerung von Grund- und Pulsstrom. Dieses in ähnlicher Form vom Metall-Schutzgas-Impulsschweißen bekannte Verfahren hat gegenüber den diskontinuierlichen Puls-Arc-Prozessen den Vorteil, unabhängig von speziellen Zündeinrichtungen mit in weiten Grenzen frei wählbaren Pulsstromparametern (Pulsform, Maximalstrom, Pulsdauer, Frequenz) arbeiten zu können. Der Grundstrom hat die Aufgabe, die Lichtbogenentladung zwischen den Stromimpulsen zu stabilisieren. Die angestrebte positive Wirkung auf den Prozess wird in den Pulsphasen realisiert.

Als Vorteile dieser Verfahrensvariante werden in [041] und [043] genannt:

- eine über den Bogenstrom kontrollierbare und einstellbare Verdampferate
- eine Verminderung der Dropletmission (gegenüber Random-Arc)
- eine maximale Verdampferate bis zu 20mal höher als beim klassischen Arc-Verfahren
- ein höherer Anteil mehrfach geladener Ionen
- ein insgesamt höherer Ionisierungsgrad

Neue Entwicklungen zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren zeigen sich im Einsatz moderner Leistungselektronik. So wird z. B. von Sobolyev der Bogenstrom einer einzelnen Pulsstromversorgung durch einen Demultiplexer auf mehrere unabhängige Verdampfer verteilt [044].

3.3 Ausgewählte elektrische Parameter und deren Einfluss

3.3.1 Allgemeine Grundlagen

Die grundlegenden elektrischen Parameter einer Bogenentladung sind der Bogenstrom und die Bogenspannung. Diese werden durch weitere Prozessparameter, wie z. B. das verwendete Targetmaterial, das Reaktivgas und den Arbeitsdruck beeinflusst. Die statische U-I-Kennlinie ist eine Möglichkeit, den Prozess zu charakterisieren und den Arbeitspunkt der Stromversorgung zu bestimmen (Abb. 3-10).

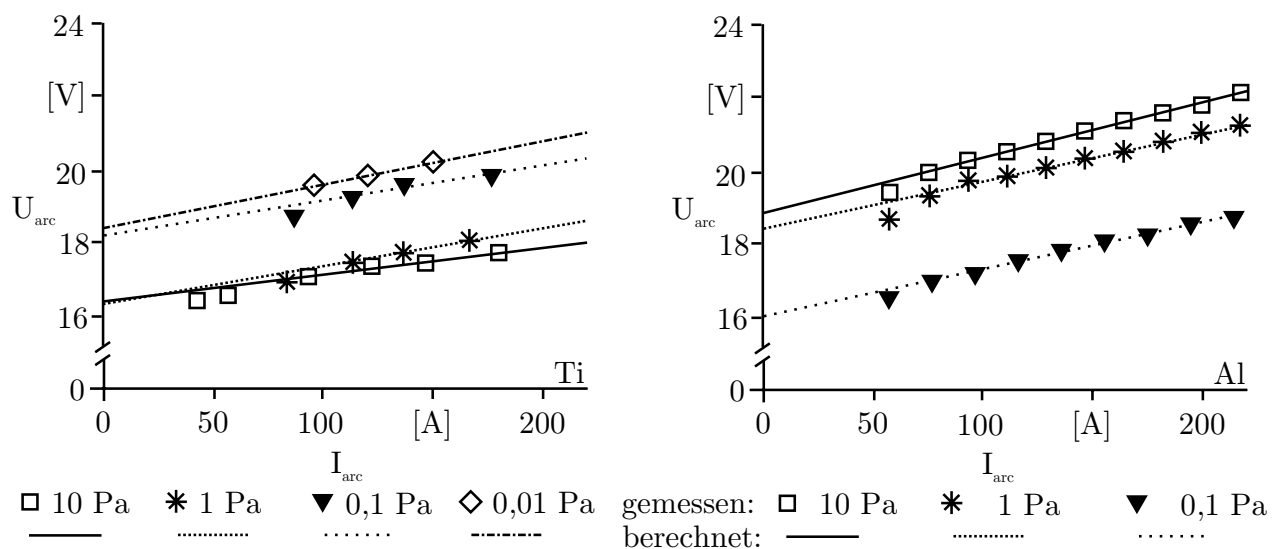


Abb. 3-10 Statische U-I-Kennlinien bei DC-Arc-Entladungen [014]

Aus der Abbildung sind der unterschiedliche Spannungsbedarf von Titan und Aluminium und eine Verschiebung der Kennlinie bei unterschiedlichen Arbeitsdrücken ersichtlich. Der Kennlinienanstieg ist relativ gering und nur wenig vom Druck abhängig [014]. Den Grund für den geringen Anstieg findet man im Verhalten der Spots. Die stattfindenden Spotteilungen kann man, wenn man nur das äußere Verhalten des Lichtbogens betrachtet, als Parallelschaltung gleicher Verbraucher ansehen. Nimmt man dann eine gleichmäßige Stromaufteilung innerhalb der Spotstrukturen an, ändert sich zunächst der mittlere Spannungsbedarf bei steigendem Gesamtstrom nicht. Nach Ellrodt kann es jedoch zu einem höheren Spannungsbedarf durch gegenseitige Beeinflussungen der Spots kommen. Dabei sind die vom Strom und der Spotbewegung abhängigen magnetischen Wechselwirkungen zwischen den gleichzeitig existierenden Spots ein Grund für einen Spannungsanstieg und seine Materialabhängigkeit [014]. Dafür spricht auch, dass bei

Anwendung äußerer Magnetfelder ein mit der Flussdichte zunehmender Spannungsbedarf erkennbar ist [045].

Eine weitere, den Prozess bestimmende elektrische Größe ist die sogenannte Biasspannung, eine negative Vorspannung des Substrates. Durch die aus dieser Spannung resultierende negative Ladung des Substrates wird eine gerichtete und beschleunigte Bewegung der Metallionen erreicht. Die kinetische Energie der Teilchen ist bestimmend für die Elementarprozesse an der Festkörperoberfläche (Abb. 3-11).

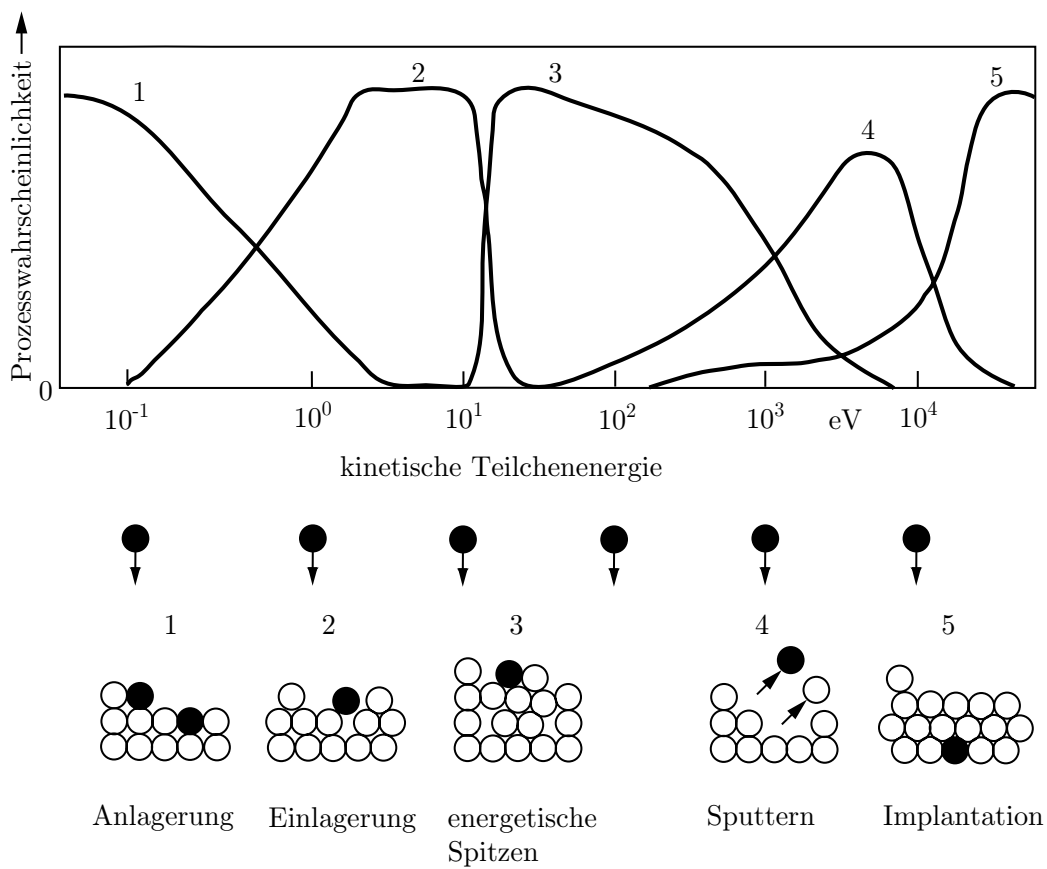


Abb. 3-11 Prozesswahrscheinlichkeiten und Veranschaulichung der Wechselwirkungen freier Teilchen mit Festkörperoberflächen [003]

Die Biasspannung ist z. B. für die Eigenspannung, die Härte, die Oberflächenrauigkeit und das Elastizitätsmodul einer Beschichtung verantwortlich. Die Höhe der Biasspannung beeinflusst die kinetische Energie der Teilchen und bestimmt damit die Art des entstehenden Prozesses. Falls die Biasspannung für einen Beschichtungsprozess zu hoch eingestellt wird, kann es zu Sputter-Prozessen kommen, die einen Abtrag an der Substratoberfläche erzeugen [046]. Ohne Biasspannung oder bei zu geringen Werten ist die Bindung zwischen der Substratoberfläche und der Beschichtung nicht optimal.

Die Einstellung der Spannung bestimmt somit die Effektivität einer Beschichtung. Im Gesamtprozess lässt sich diese Erkenntnis bei der Vorbehandlung der Substratoberfläche nutzbar machen, indem ein Metallionenätzen bei Biasspannungen bis in den kV-Bereich vorgenommen wird, was zu einer Reinigung und Aktivierung der Substratoberfläche führt.

3.3.2 Einfluss der Pulsparameter auf die Eigenschaften des Plasmas

Die Anwendung von gepulsten Vakuumbogenentladungen führt bei Betrachtung der dynamischen u-i-Kennlinie zu Abweichungen gegenüber der statischen Kennlinie. Bedingt durch dynamische Plasmareaktionen weist der Arbeitspunktverlauf eine deutliche Hysterese auf. Die Bogenspannung liegt im Bereich der ansteigenden Pulsflanke um 2 ... 4 V über der statischen Kennlinie. Der Lichtbogen reagiert stärker auf einen Stromanstieg als auf einen Stromabfall. Daher ergibt sich in der Pulsphase ein höherer Wert der umsetzbaren Leistung [014].

Ein wesentlicher Parameter für die Beurteilung einer Vakuumbogenentladung ist der Ionenstrom, der von den elektrischen und physikalischen Größen beeinflusst wird. Die Verteilung der Ionen, der Verlauf des Ionenstromes und die Art der Ladung der Ionen bestimmen die Ausbildung der Beschichtung.

Für den Random-Arc wurde festgestellt, dass die Ionenemission bevorzugt senkrecht zur Katodenoberfläche erfolgt und die Abscheiderate in erster Näherung eine Kosinus-Verteilung aufweist [047]. Der Gesamtionenstrom beträgt hier ca. 8 - 12 % des Bogenstromes [048, 049]. Dass der Verlauf des Bogenstromes einen entscheidenden Einfluss auf den Ionenstrom hat, zeigt sich bei der Betrachtung von gepulsten Bogenströmen. In [050] wird z. B. für halbsinusförmige Impulse mit einer Impulsfrequenz von 50 Hz beschrieben, dass die Erhöhung des Impulsstromes zu einer Erhöhung des Ionenstromes in der Katodensenkrechten bei gleichzeitig erhöhter Ionenenergie führt. Der Anteil des Ionenstromes am Gesamtstrom kann im Mittel auf bis zu 30 % erhöht werden, wobei in den Phasen hoher Stromanstiegsgeschwindigkeiten Werte von bis zu 55 % angegeben werden [049].

Untersuchungen [049, 050] zeigen für den gepulsten Vakuumbogen einen überproportionalen Ionenstromanstieg in der ersten Impulsphase. Es werden übereinstimmend Faktoren zwischen 1,8 und 2,2 (für Titankatoden) angegeben. Der Abb. 3-12 ist zu entnehmen, dass senkrecht über dem Target (0°) zu Beginn des Bogenstromimpulses eine Überhöhung des Ionenstromes auftritt. Eine zweite Sonde in einem Winkel von 45° zur Senkrechten zeigt jedoch kaum noch einen Ionenstrom und

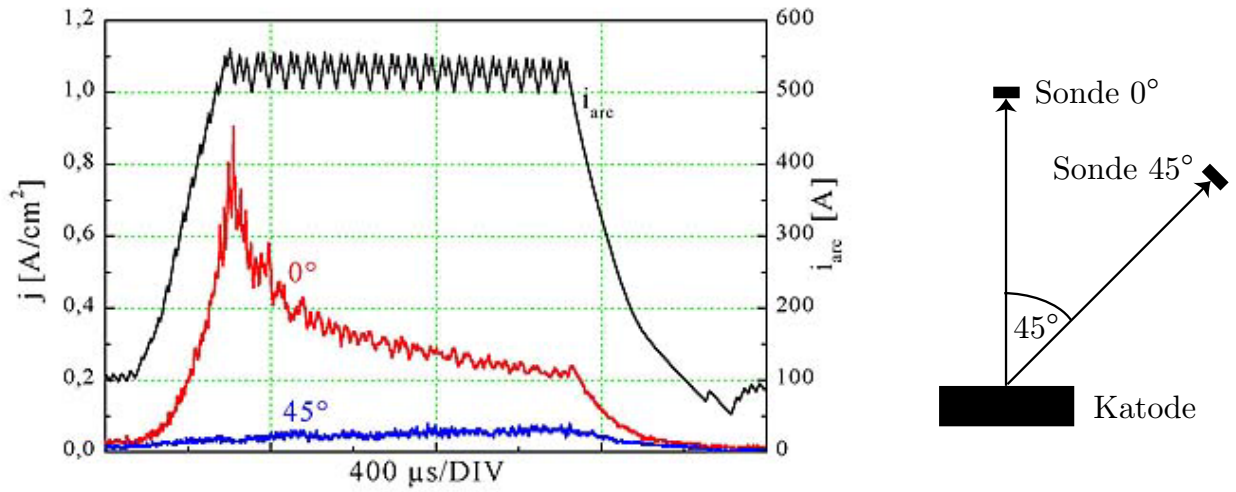


Abb. 3-12 Bogenstrom und Ionenströme während des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens [049]

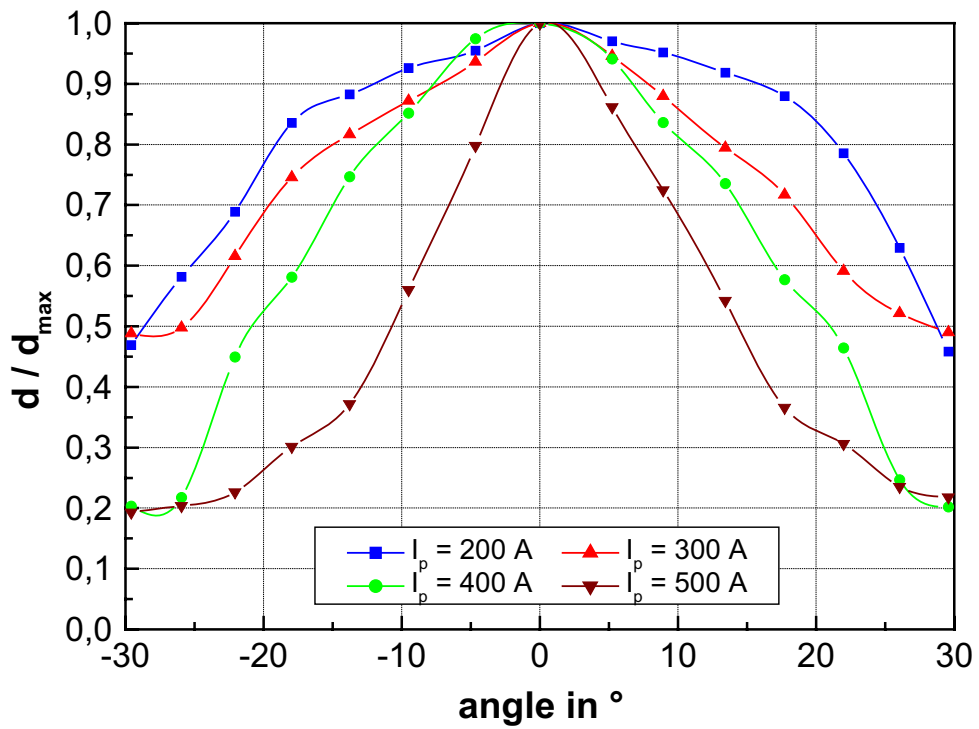


Abb. 3-13 Schichtdickenverteilung als eine Funktion des maximalen Pulsstromes [051]

auch keine Überhöhung. Dies ist auf eine Fokussierung des Ionenstromes (Plasmas) zurückzuführen. Diese Fokussierung ist von den Pulsparametern des Bogenstromes abhängig und führt zu einer entsprechenden Schichtverteilung auf dem Substrat (Abb. 3-13).

Die Erhöhung des Ionenstromes durch Bogenstromimpulse wurde u. a. auch von Anders et al. untersucht. Er hat sich mit der Verteilung der Ladungszustände der Ionen beschäftigt und unter Verwendung kurzer Bogenstromimpulse Mehrfachladungen der Metallionen erzeugt. In seinen Untersuchungen hat er festgestellt, dass die Pulsdauer und die Pulsfrequenz die Mehrfachladung der Metallionen beeinflusst. Bei dieser „current spike“ - Methode zeigt sich eine temporäre Erhöhung des Anteils an Mehrfachladungen der Ionen zu Beginn des Bogenstromimpulses. Im weiteren Verlauf stellt sich dann jedoch ein DC-Verhalten ein, was zu keiner weiteren Ladungserhöhung der Ionen führt [052, 053]. Über die Einstellung der Pulsparameter ist es also möglich, den schichtbildenden Ionenstrom im Verhältnis zum Bogenstrom zu erhöhen. Dies hat sich auch bei eigenen Untersuchungen zu verschiedenen Bogenstromformen bestätigt [054]. So gab es unter Verwendung von Rechteckimpulsen optimale Werte der Pulsdauer und -frequenz, um für die verwendete Anordnung den Ionenstrom zu maximieren.

3.4 Ausgewählte magnetische Parameter und deren Einfluss

3.4.1 Begriffe und Definitionen

Die Spots lassen sich in zwei Arten unterteilen, wenn man ihr phänomenologisches Verhalten betrachtet. In der Literatur werden dazu Spots des Typ I und des Typ II unterschieden [055, 056, 057, 058]. In Tab. 3-2 sind einige Kenngrößen der Spottypen zusammengetragen.

Für die Untersuchungen sind Spots vom Typ II verwendet worden, da sie sich im Hinblick auf die Vergleichbarkeit gewonnener Ergebnisse besser eignen. Bei Spots des Typs I ist der Grad der Kontaminierung der Oberflächen für jede einzelne Messung von Bedeutung und daher zu berücksichtigen.

Je nach Wirkungsrichtung des Magnetfeldes auf die Spots (Katodenebene in Bezug zum Stromfluss) unterscheidet man axiale und transversale Magnetfelder. Bei einem axialen Magnetfeld verlaufen die Feldlinien parallel zur Stromrichtung. Bei einem transversalem Magnetfeld verlaufen sie hingegen senkrecht zur Stromrichtung. Dies sind jeweils Extremfälle, da bei einer entsprechenden räumlichen Ausbildung des

Magnetfeldes die Feldlinien auch andere Winkel einnehmen.

Tab. 3-2 *Eigenschaften der Spots vom Typ I und Typ II* [014, 056, 057]

	Typ I	Typ II
Vorkommen	kontaminierte Oberflächen	saubere Oberflächen
Spot-Geschwindigkeiten	10 ... 500 (1000) m/s	0,5 ... 10 (150) m/s
Krater / Spottrack	0,2 ... 2 μm / diskontinuierlich	5 ... 100 μm / kontinuierlich
Lebensdauer	< 0,01 μs	< 0,1 μs
Stromdichte	$10^8 \dots 10^9 \text{ A/m}^2$	$10^{10} \dots 10^{12} \text{ A/m}^2$
Katodenabtrag	< 0,036 g/(A*h)	0,036 ... 0,36 g/(A*h)
Katodenfall	11 ... 16 V	20 ... 25 V
Maximalstrom je Spot	3,5 ... 20 A	75 ... 100 A

Neben den externen Magnetfeldern treten auch die Eigenmagnetfelder der Spots in Erscheinung. Ohne äußeres Magnetfeld ist z. B. bei einem Hochstrombogen [041] der Stromimpuls für eine Aufteilung des Spots verantwortlich. Die entstehenden Spots streben ohne externes Magnetfeld nur durch die Wirkung ihres Eigenmagnetfeldes ringförmig auseinander.

3.4.2 Robson-Drift und retrograde Bewegung

Die Robson-Drift entsteht durch Magnetfeldanteile, die im spitzen Winkel zur Katodenoberfläche verlaufen [059]. Die Ablenkung erfolgt in Richtung des sich öffnenden Winkels Θ_B zwischen Magnetfeldvektor und Katodenoberfläche (Abb. 3-14). Kleberg ermittelte Driftwinkel Φ_V im Bereich von $30^\circ \pm 7^\circ$ bei positivem als auch bei negativem Driftwinkel [057]. Die Robson-Drift zeichnet sich dafür verantwortlich, dass die Spots innerhalb „tunnelförmiger“ Magnetfelder geführt werden können (Abb. 3-15). Die Spots bewegen sich auf einer Spur, auf der die senkrechte (y-)Komponente der magnetischen Flussdichte Null ist. Insbesondere bei großen B-Gradienten um diesen Bereich ist diese Spur sehr deutlich ausgeprägt und das Verhalten kann als stark gesteuert bezeichnet werden.

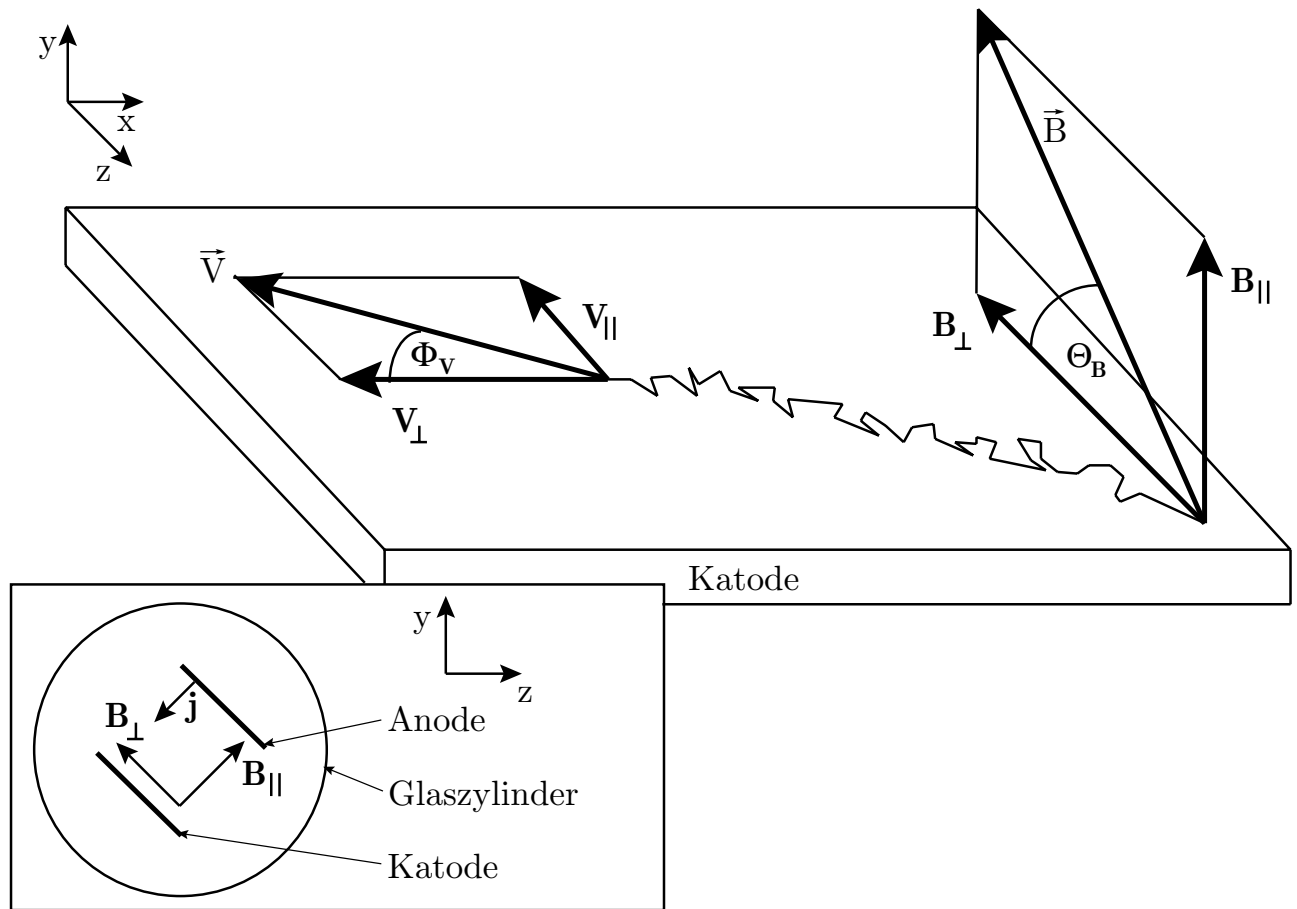


Abb. 3-14 Robson-Drift (schematisch) [057]

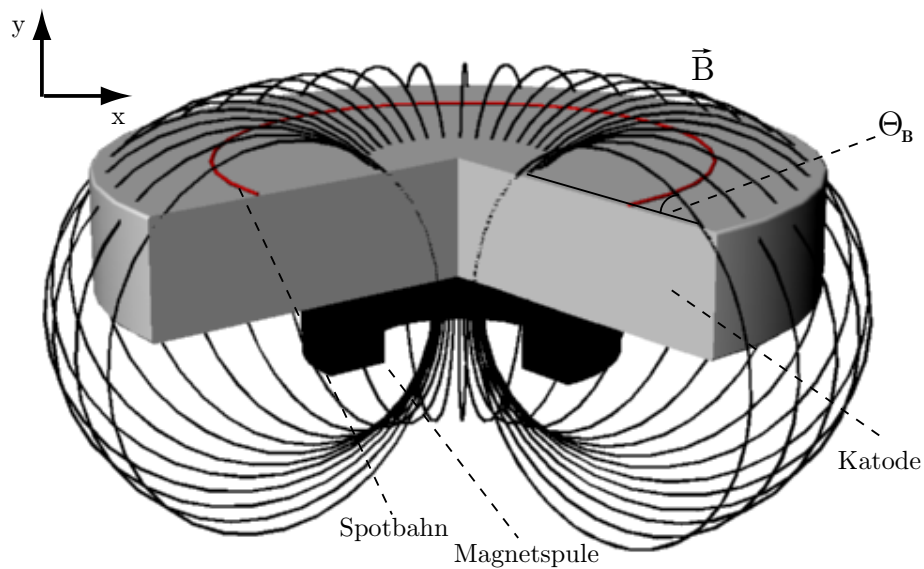


Abb. 3-15 Beispiel eines „tunnelförmigen“ Magnetfeldes für ein rundes Target mit einer Magnetspule auf der Targetunterseite (schematisch)

Ein anderer Mechanismus ist die sogenannte „retrograde Bewegung“ der Spots. Wenn sich der Spot in einem zur Stromrichtung transversalem Magnetfeld befindet, dann bewegt er sich entgegen der Lorentz-Kraft. Diese entgegengesetzte Bewegung wird als retrograd bezeichnet. Die Ursachen dieses Effektes werden schon seit einigen Jahrzehnten untersucht. Kleberg geht nach seinen Untersuchungen zu Ursachen der retrograden Bewegung davon aus, dass ein Plasmaphänomen, die sogenannten „Jets“, dafür verantwortlich sind [057, 060].

Das Plasma, welches auf der retrograden Seite eingeschlossen wird, wird instabil. Jets werden auf einer Nanosekundenzeitskala produziert. Im Jetplasma, welches quer zum Magnetfeld expandiert, entwickelt sich ein elektrisches Feld, welches die Zündbedingungen auf der retrograden Seite verbessert und somit zur Neuzündung von Spots auf der retrograden Seite führt. Neue Spots werden jeweils in einem Abstand von etwa 200 ... 300 μm in Jetrichtung gebildet (siehe Abb. 3-16).

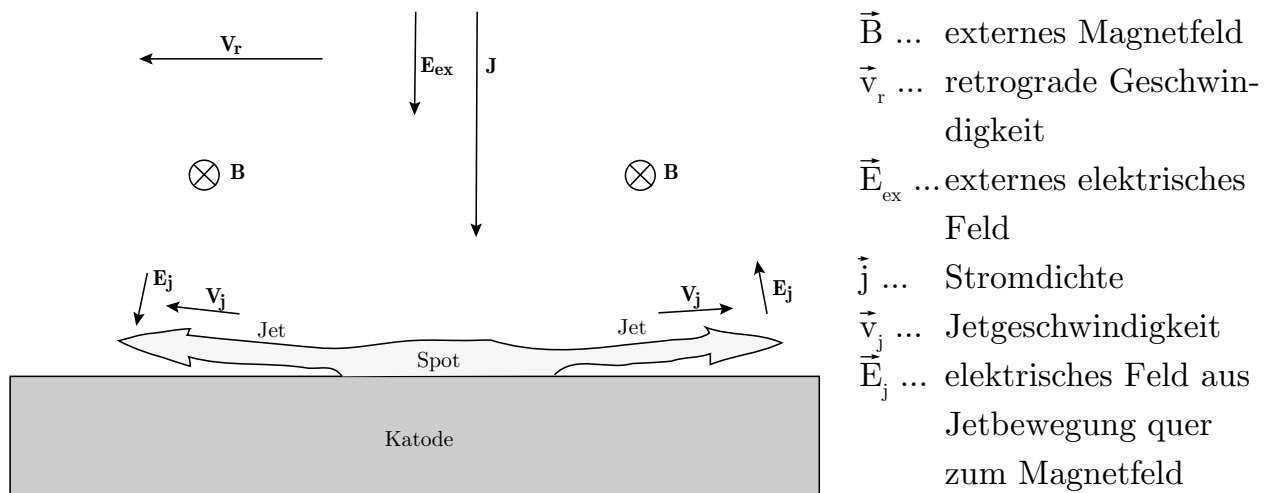


Abb. 3-16 Retrograde Bewegung - Feldverhältnisse bei reinem Transversalfeld
 $\vec{B} = \vec{B}_\perp$ [057]

Die Bewegung der Spots wird zusätzlich durch eine Zufallsbewegung überlagert. Diese chaotische Komponente überwiegt kurz vor dem Verlöschen des Bogens [057]. Das Zusammenspiel zwischen retrograder Bewegung und der Robson-Drift ist somit die Grundlage für die Möglichkeit der Steuerung der Spotbewegung. Ein Vorschlag zur Modellbildung bei Anwendung eines Magnetfeldes auf einen Random-Arc wurde z. B. von Care durchgeführt [061].

Anwendung findet die Steuerung der Spotbewegung z. B. im „ProArc-System“ von Zimmer et al. Für einen gesteuerten Abtrag einer rechteckförmigen Katode wird auf der Rückseite eine Matrix aus Elektromagneten angebracht, die entsprechend ein- bzw.

ausgeschaltet werden, um die Spots in definierten Bereichen der Katode zu bewegen [062].

3.4.3 Einfluss von Magnetfeldern auf Plasma- und Schichteigenschaften

Ein Magnetfeld in Katoden- bzw. Plasmaumgebung beeinflusst die Plasmaeigenschaften grundlegend. So ist die kinetische Energie und die Ladung der Ionen von der Stärke des Magnetfeldes abhängig. Anders et al. ermittelten für unterschiedliche Katodenmaterialien in Abhängigkeit von der Magnetflussdichte unterschiedliche kinetische Energien der Ionen und unterschiedliche Bogenspannungen (Abb. 3-17).

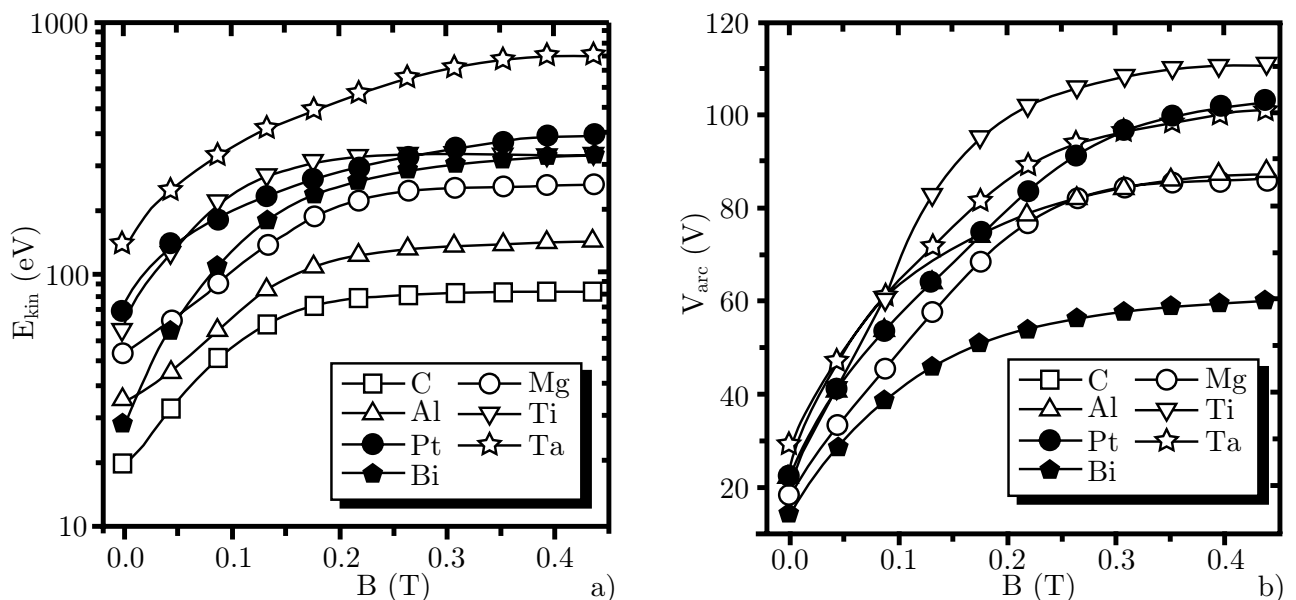


Abb. 3-17 Kinetische Energie der Ionen (a) und Bogenspannungen (b) in Abhängigkeit von der Magnetflussdichte für verschiedene Katodenmaterialien [063]

Es wurde eine Steigerung dieser Parameter bis zu einer Magnetflussdichte von 200 mT beobachtet. Danach trat ein Sättigungseffekt auf. Die ansteigende Bogenspannung bei steigender Magnetflussdichte lässt sich durch eine Widerstandserhöhung der Entladung, die ihre Ursache in einer „magnetische Isolation“ der Anode durch das Magnetfeld hat, erklären [063].

Der Einsatz eines Magnetfeldes dient häufig dazu, die Ladung der Metallionen zu erhöhen. Anders et al. haben Untersuchungen dazu durchgeführt, indem sie die Ladungsträgerverteilung in einem gepulsten Plasma ($I_{arc} = 300$ A; $t_p = 250$ μ s) analysiert haben. Wie in Abb. 3-18a zu erkennen ist, kommt es bei einer Erhöhung

der Magnetflussdichte zu Mehrfachladungen der Ionen. Diese Steigerung ist für unterschiedliche Materialien vor allem im Bereich bis ca. 700 mT zu beobachten [064]. Am Beispiel von Aluminium als Katodenmaterial ist die Verteilung der Ladungen in Abhängigkeit von der Magnetflussdichte in Abb. 3-18b dargestellt. Die größten Veränderungen in der Ladungsverteilung sind bei Werten der Magnetflussdichte bis ca. 500 mT zu finden.

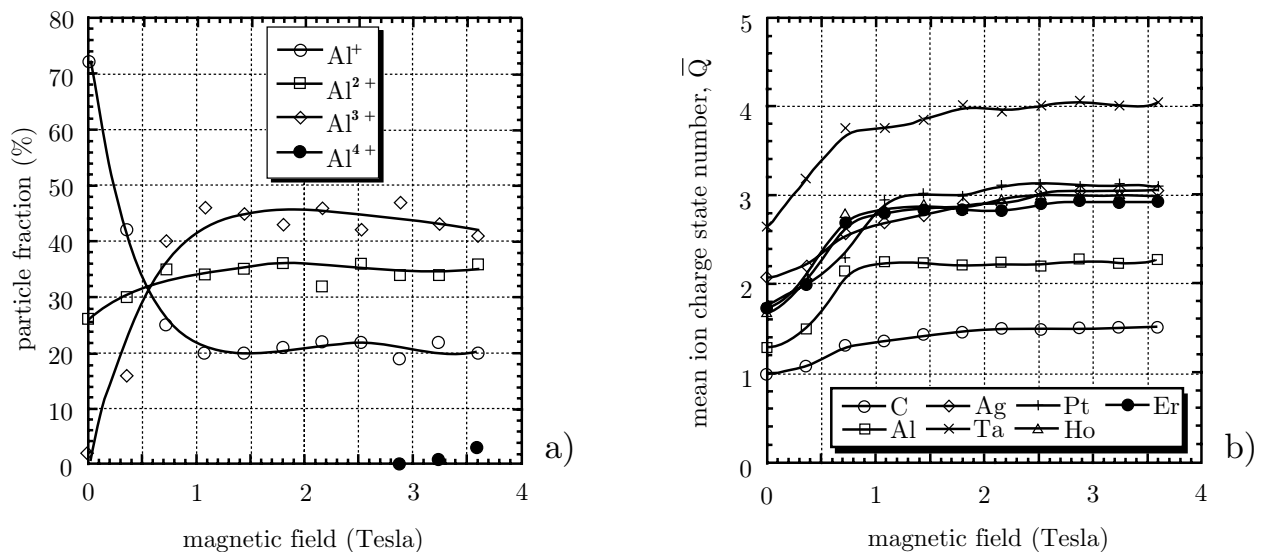


Abb. 3-18 Verteilung des Ionenladungszustandes für Aluminium (a) und mittlere Ionenladungszahlen für unterschiedliche Katodenmaterialien (b) in Abhängigkeit von der Magnetflussdichte [064]

Die Veränderungen im Plasma durch die Magnetfeldeinwirkung führen zu veränderten Schichteigenschaften. Industrielle Bedeutung haben Magnetfelder zur Zeit vor allem beim Filtered-Arc und im Steered-Arc-Prozess, bei denen im Allgemeinen ein statisches Magnetfeld während einer Gleichstromentladung wirkt.

Der Steered-Arc-Prozess (siehe Abschnitt 3.2.2) führt zu entscheidenden Verbesserungen der Beschichtung [037]. Dies betrifft vor allem die Erhöhung von Schichthärte und der Eigenspannung. Die Veränderung der Emissionscharakteristik führt zu einer Fokussierung des Plasmas und einer Verringerung der Droplets [038]. Durch die Verringerung des Ionenstromanteiles am Bogenstrom kommt es allerdings zu einer Verringerung der Beschichtungsrate [038]. Homogenität und Dichte der Schicht sind vom Verdampferstrom abhängig. Der Reaktivgasdruck und die Biasspannung sind hier weniger bedeutend [037]. Auf Grund des verringerten Katodenabtrages wird für die Abscheidung stöchiometrischer Schichten ein geringerer Reaktivgasdruck

benötigt [037]. Es kann eine poröse Schichtstruktur ähnlich Versuchen bei zu geringer Biasspannung festgestellt werden [035]. Hierbei wird die geringere Ionenenergie als Begründung angegeben.

Verbunden mit dem veränderten Laufverhalten der katodischen Lichtbogenfußpunkte wird ein verringerter Katodenabtrag festgestellt. In den Messungen zu [065] verringert sich dessen Wert durch Anwendung eines axialen Magnetfeldes von ca. $33 \mu\text{g}/\text{C}$ auf ca. $15 \mu\text{g}/\text{C}$ (Titan unter Stickstoffatmosphäre, ca. 1 Pa , $I_{\text{arc}} = 60 \text{ A}$). Das findet Bestätigung in [035], wo die Verringerung von ca. 3 auf $2,5 \text{ g} / 70 \text{ A}\cdot\text{h}$ durch bevorzugtes Laufen der Spots in nitrierten Bereichen begründet wird. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Ionenstromanteil am Bogenstrom beim Steered-Arc deutlich reduziert ist (von $8 \dots 10$ auf $2,5 \%$ [038]). Im Zusammenhang mit einer reduzierten Ionenenergie wird von einer um ca. 30% verringerten Beschichtungsrate berichtet [034]. Die Messungen von Reichel bestätigen dieses Verhalten. Es kam zu einer Abnahme der Schichtdicke von ca. $10,5$ auf $6,5 \mu\text{m}/\text{h}$ bei 70 A und $300 \text{ }^\circ\text{C}$ [035].

Umfangreiche technologische Untersuchungen zum Vergleich des Steered- und des Random-Arc wurden u. a. bereits Ende der achtziger Jahre in der Gruppe von Prof. Münz durchgeführt und u. a. in [066] publiziert. Die Anwendung des Steered-Arc-Prozesses liegt im Bereich qualitativ hochwertiger Beschichtungen, bei denen die Quantität eine untergeordnete Rolle spielt.

4 Experimentelle Basis

4.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen wurde eine modifizierte Beschichtungsanlage „HTC 625 Multi-Lab ABS“ der Firma Hauzer Techno Coating genutzt. In dieser Anlage wurden Verdampfer der Firma Eifeler Werkzeuge GmbH eingebaut (Abb. 4-1).

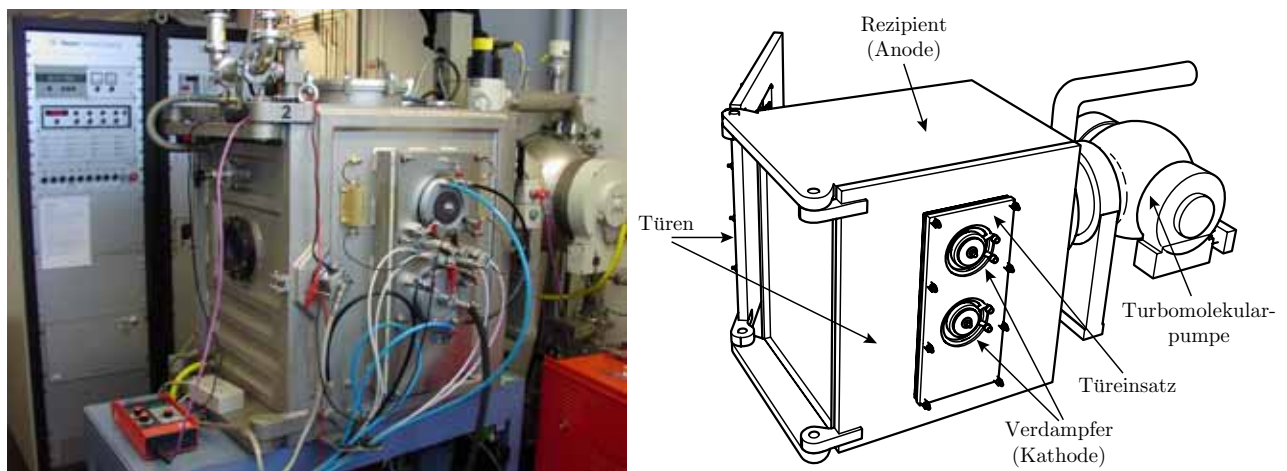


Abb. 4-1 Verwendete modifizierte Beschichtungsanlage „HTC 625 Multi-Lab ABS“

Der rechteckige Edelstahlrezipient (625 mm x 450 mm x 700 mm) ist wassergekühlt. Die verwendeten Targets hatten einen Durchmesser von 100 mm. Zur Gewährleistung gleicher Umgebungsbedingungen für die einzelnen Experimente konnte das verwendete Target durch ein separates Kühlgerät auf eine definierte Temperatur gekühlt werden.

Für die Untersuchungen kamen drei unterschiedliche Targetmaterialien zum Einsatz:

- Titan (99,999%)
- Titan-Aluminium (33,7% / 66,3%)
- Chrom (99,999%)

Das verwendete Arbeitsgas war Stickstoff bei einem Arbeitsdruck von 1 Pa. Es wurden TiN-, TiAlN-, und CrN-Schichten auf polierten Stahlronden mit einem Durchmesser von 22 mm erzeugt. Bei einigen Versuchen wurden zusätzlich Silizium-Proben beschichtet, um die Schichtstruktur nach dem Brechen der Proben mit einem Rasterelektronen-

mikroskop an der Bruchkante untersuchen zu können.

Die Substrate wurden vor der Beschichtung gereinigt. Für die Substratreinigung wurde ein Ultraschallbad mit 10%igem Ultrasonol 7 und anschließendem Spülen mit Äthanol verwendet. Vor dem eigentlichen Beschichtungsprozess wurde für eine weitere Reinigung und Oberflächenaktivierung der Substrate ein Metallionenätzen in Argon-Atmosphäre durchgeführt.

Die Stromversorgung der Beschichtungsanlage wurde mit einer konventionellen Inverter-Impuls-Schweißstromquelle realisiert. Die Stromquelle „SAPROM 908“ der Firma Lorch Schweißtechnik GmbH kam in einer leicht modifizierten Variante zum Einsatz. Die Modifikation betraf lediglich die Erhöhung der Leerlaufspannung von 63 auf 100 V, um ein besseres Zündverhalten (mechanischer Zündfinger) zu erreichen. Diese Quelle zeichnete sich durch eine gute Dynamik aus und ermöglichte durch eine Programmierschnittstelle das Erstellen eigener Pulsmuster. Tab. 4-1 sind einige Daten der Stromquelle zu entnehmen.

Tab. 4-1 Ausgewählte Daten der Stromquelle „SAPROM 908“

Parameter	Wert
I_{DC} in A	4 ... 450 (ED 60 %)
I_p in A	25 .. 700 (je nach t_p)
f_p in Hz	10 ... 500
U_{leer} in V	100
Kennliniencharakter	konstant / fallend

Die Messwerterfassung erfolgte durch Strommesssysteme und Spannungstastköpfe der Firma Tektronix, die über ein mehrkanaliges Messsystem (LTT 184 der Firma Labortechnik Tasler GmbH) die synchronisierten Messdaten auf einen Computer abspeicherten. Zur Auswertung der Datensätze wurde die Software „Origin“ der Firma OriginLab und „FAMOS“ der Firma IMC genutzt.

4.2 Verwendete Messmethoden und -technik

4.2.1 Ionenstrommessung

Die Ionenstrommessung erfolgte nach dem Prinzip der Langmuir-Sonde. Sie ist eine invasive elektrostatische Sonde, die sowohl in stationären, wie auch in strömenden Plasmen eingesetzt werden kann. Je nach der Form der Sonde kommt es dabei zu einer Beeinflussung der Langmuirkennlinie (Abb. 4-2).

- A: Die Sonde liegt auf einem negativen Potenzial. Elektronen werden abgestoßen und es treffen nur Ionen auf die Sonde. Daraus resultiert ein konstanter Wert.
- B: Schnelle Elektronen, welche die elektrische Abstoßung überwinden, gelangen an die Sonde. Die Kennlinie steigt an.
- C: Durch das veränderte Potenzial der Sonde gelangen zunehmend mehr Elektronen auf die Sonde und der Stromfluss erhöht sich. Die Kennlinie steigt an.
- D: Es bildet sich eine Raumladungsschicht (Plasma-Randschicht) aus Elektronen, die die Ionen abstößt. Bei einer planaren Sonde nimmt die Kennlinie einen konstanten Wert an.

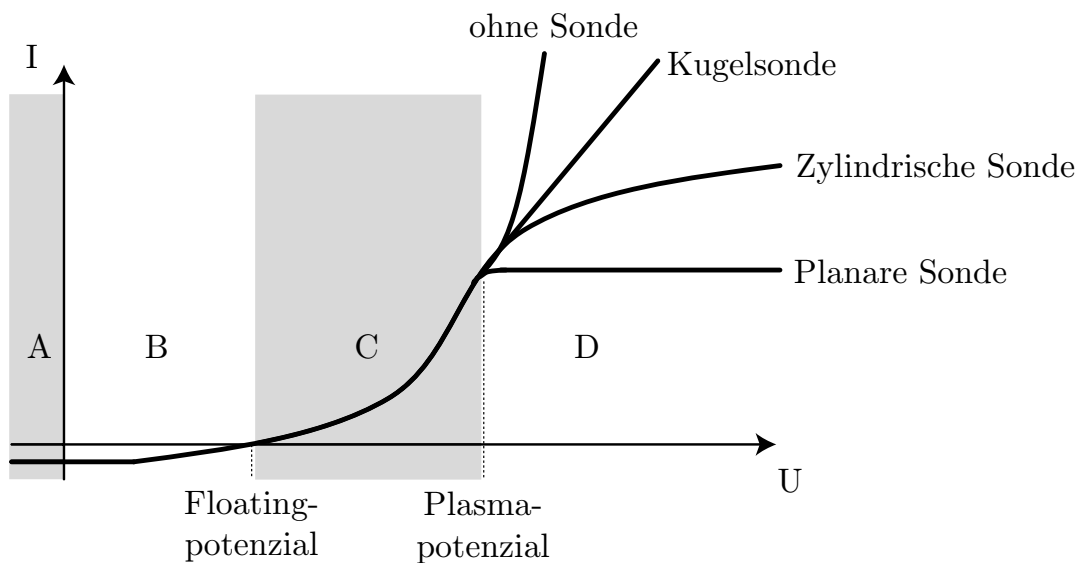
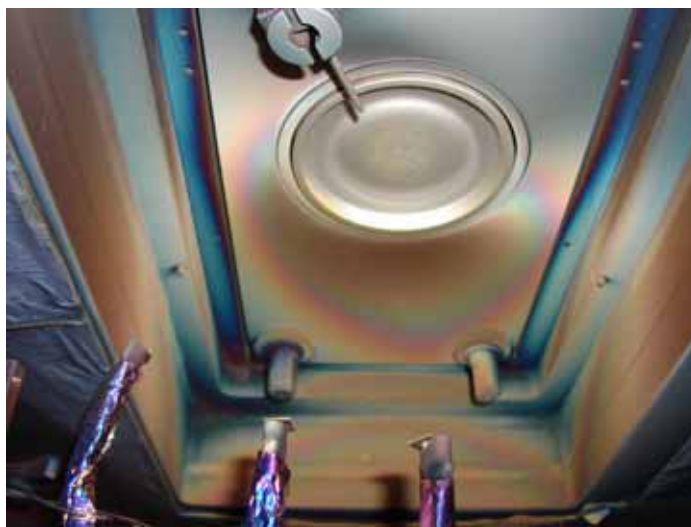
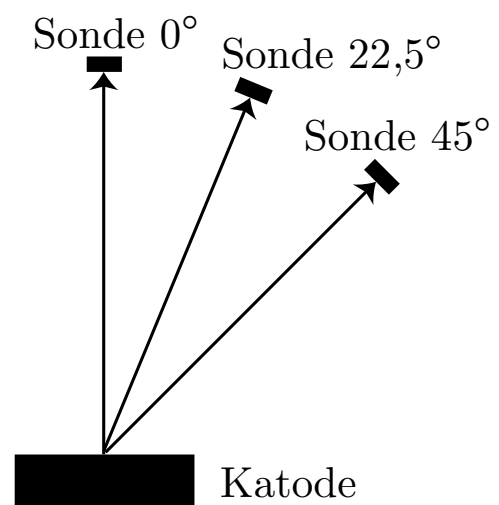


Abb. 4-2 Langmuirkennlinie (schematisch) für verschiedene Sondenformen

Durch die Verwendung einer entsprechend hohen negativen Spannung muss sichergestellt werden, dass ausschließlich der Ionensättigungsstrom gemessen wird. Es ist zu beachten, dass der Sondenstrom beim Prozess mit einer deutlich geringeren Geschwindigkeit als der Bogenstrom ansteigt, was in der Prozessträgheit und der begrenzten Dynamik der Sondenspannungsversorgung begründet ist. Weiterhin problematisch an dieser Art der Messung ist die sich ständig ändernde Position der Spots in Bezug zur Sonde, welches als Fehlerquelle für die Ionenstrommessung, insbesondere für die Messung der räumlichen Verteilung, einget (Abb. 4-3).



a) reale Anordnung



b) schematisch

Abb. 4-3 Anordnung der Ionenstromsonden ($A = 1\text{cm}^2$)

4.2.2 Härtemessung

Die Nanoindenter-Untersuchung stellt ein innovatives Analyseverfahren für die Bewertung der Schichthärte dar. Im Bereich der Dünnschichttechnologie hat sich das Verfahren der Nanoindentation als Untersuchungsverfahren zur Bestimmung wichtiger physikalischer und mechanischer Kenngrößen und Eigenschaften beschichteter Oberflächen etabliert. Analog zu den konventionellen Mikrohärtmessverfahren wird bei der Nanoindentation die Diamantspitze (einige nm) in den Prüfling eingebracht. Die Diamantspitze wird dazu mit einer definierten Kraft auf die zu vermessende Oberfläche gesetzt. Die entstehende Eindringtiefe wird als Funktion der Kraft aufgezeichnet. Aus der entstehenden Last-Entlastungs-Hysteresekurve lässt sich die Härte und das E-Modul (Reduced Modulus) bestimmen.

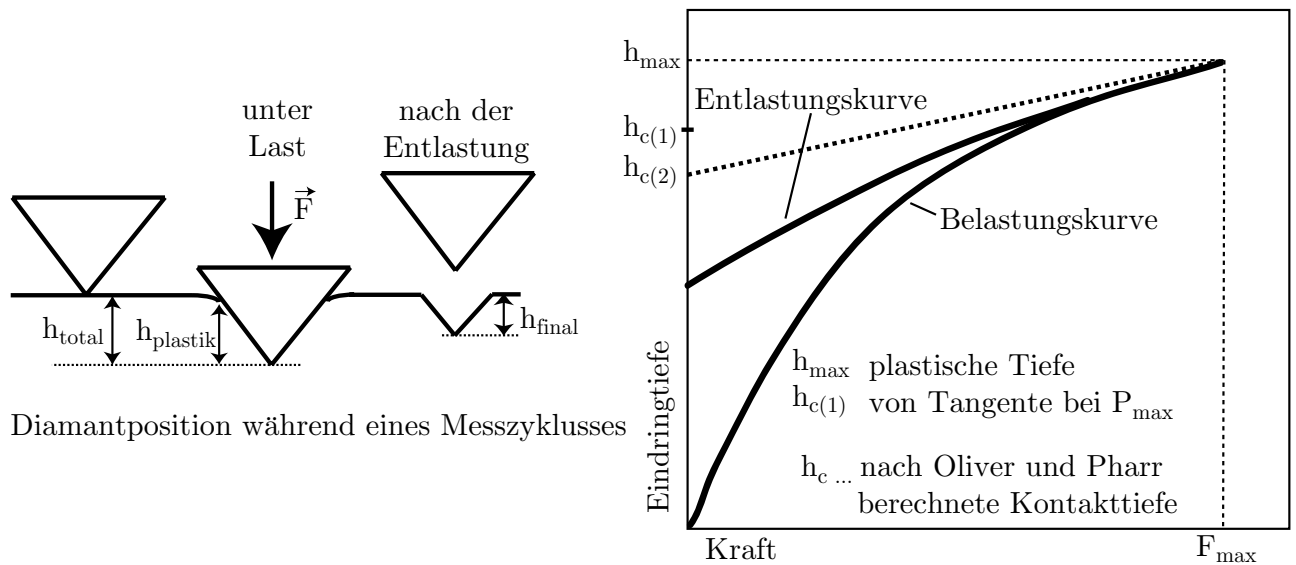
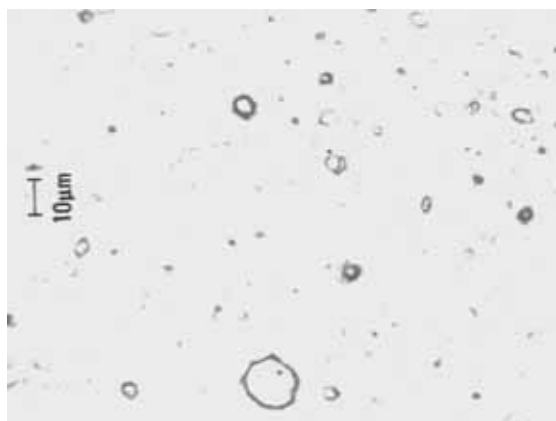


Abb. 4-4 Schematische Darstellung der Härtemessung

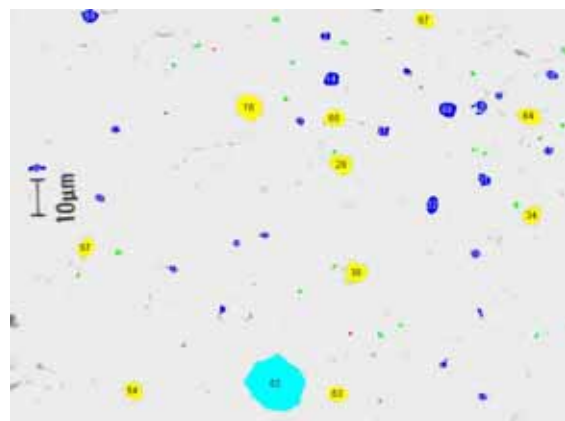
Die Härtewerte werden in der Einheit $[H] = \text{GPa}$ angegeben. Eine Umrechnung in HV-Vickershärte ($\text{HV}_{0,002}$) ist durch Multiplikation mit dem Faktor „94,5“ möglich. Bei der Messung ist eine entsprechende Anzahl von Versuchen für eine statistische Sicherheit notwendig. Abb. 4-4 zeigt schematisch die Vorgehensweise für einen Messzyklus.

4.2.3 Dropletbestimmung

Für die Bewertung der Droplets wurden von der Substratoberfläche Aufnahmen mit 500-facher Vergrößerung erstellt. Diese Aufnahmen wurden über ein Script mit



a) Originalaufnahme



b) Nach der Bearbeitung in „analySIS“
(Farben markieren Größenkategorien)

Abb. 4-5 Oberflächenaufnahme mit 500-facher Vergrößerung

der Software „analySIS“ ausgewertet, die die Droplets nach ihrer Größe und ihrem Flächenanteil bewertet (Abb. 4-5).

4.2.4 Erfassung der Fußpunktbewegungen

Die Erfassung der Fußpunktbewegungen wurde durch Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera realisiert (Kodak Ekta Pro HS 4550mx; 4500 bis 40500 Bilder pro Sekunde; Speicherkapazität 6000 Vollbilder). Die entstandenen Bilder ermöglichten eine Auswertung der Geschwindigkeit und der Bewegungsrichtung der Spots. Synchron dazu wurden die elektrischen Parameter durch ein mehrkanaliges Messsystem aufgezeichnet. Abb. 4-6 zeigt die Vorgehensweise bei der Auswertung einer Spotbewegung während der Pulsphase des Bogenstromes.

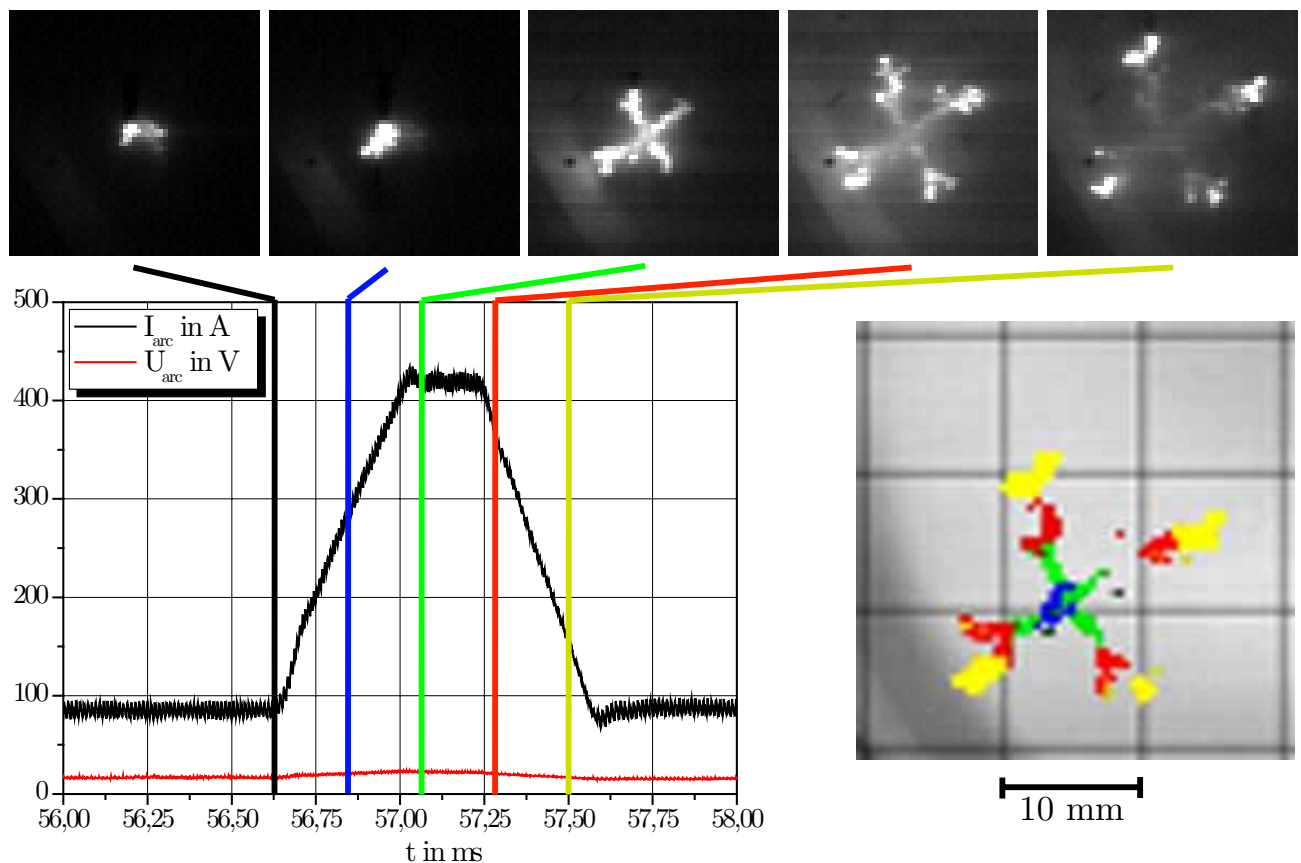
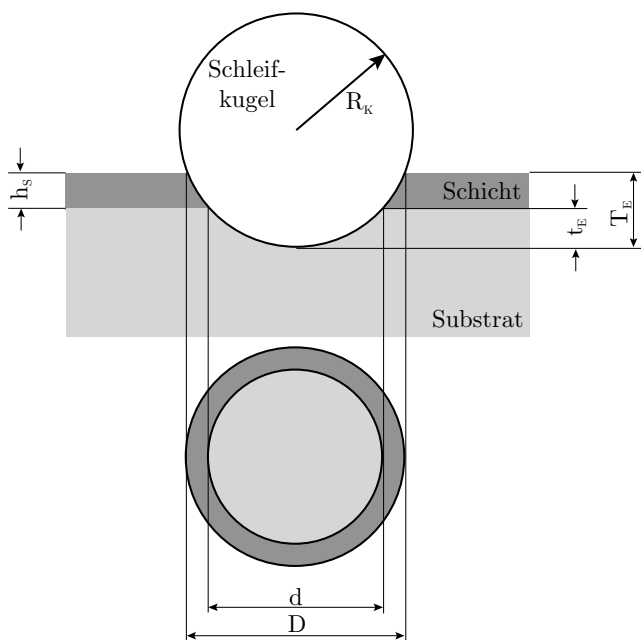


Abb. 4-6 Vorgehensweise bei der Auswertung einer Spotbewegung

4.2.5 Schichtdickenbestimmung

Die Bestimmung der Schichtdicke konnte auf zwei unterschiedlichen Wegen erfolgen. Eine Möglichkeit bestand in der Nutzung der Siliziumsubstrate und der daraus entstandenen REM-Aufnahmen. Über den angegebenen Maßstab der Aufnahmen konnte die Schichtdicke vermessen werden.

Eine zweite Möglichkeit war die Verwendung der Kalottenschliff-Methode, die auf den Ronden angewendet wurde. Eine Stahlkugel wird dazu genutzt, eine Kalotte in die Oberfläche der Beschichtung zu schleifen. Als Schleifmittel dient eine polykristalline Diamantsuspension (1 ... 5 μm Korngröße). Anschließend ist es möglich gemäß Abb. 4-7 die Durchmesser der Kalotte mit einem Auflichtmikroskop zu messen. Die Werte d und D führen über die Formel (4-1) bzw. (4-2) zur Schichtdicke. Da die Größen d und D quadratisch in die Schichtdicke eingehen, ist das Vermessen dieser Größen wichtig für die Genauigkeit der Schichtdickenbestimmung. Es sollte auch nur wenig in das Substrat eingeschliffen werden (kleines t_E).



$$h_S = \sqrt{R_K^2 + \frac{D^2}{4}} - \sqrt{R_K^2 + \frac{d^2}{4}} \quad (4-1)$$

- für $D, d \ll R_K$ gilt:

$$h_S = \frac{D^2 - d^2}{8 \cdot R_K} \quad (4-2)$$

h_S ... Schichtdicke

R_K ... Schleifkugelradius

T_E ... Gesamteindringtiefe der Kugel

t_E ... Eindringtiefe in das Substrat

d ... Durchmesser an Grenze Schicht-Substrat

D ... Durchmesser an Oberfläche

Abb. 4-7 Kalottenschliff-Methode

Diese Art der Schichtdickenbestimmung kann im Zusammenspiel mit einer CCD-Kamera und entsprechender Softwareauswertung für den industriellen Einsatz automatisiert werden [067].

4.2.6 Magnetfeldmessungen und -simulationen

Eine experimentelle Bestimmung des räumlichen Verlaufes der Magnetfelder konnte nicht vorgenommen werden. Es war jedoch möglich, durch ein Messgerät, das auf Basis des Halleffektes funktioniert, vergleichende punktuelle Messungen durchzuführen.

Bei einer Hall-Sonde wird ein n-dotierter Halbleiter von einem konstanten Strom durchflossen. Ein senkrecht darauf stehendes Magnetfeld übt auf die sich bewegenden Ladungsträger eine Lorentzkraft aus. Dies sorgt für einen Elektronenüberschuss auf dem einen Teil der Fläche und einen Elektronenmangel auf dem anderen, was sich als Hallspannung U_H erfassen lässt (Abb. 4-8).

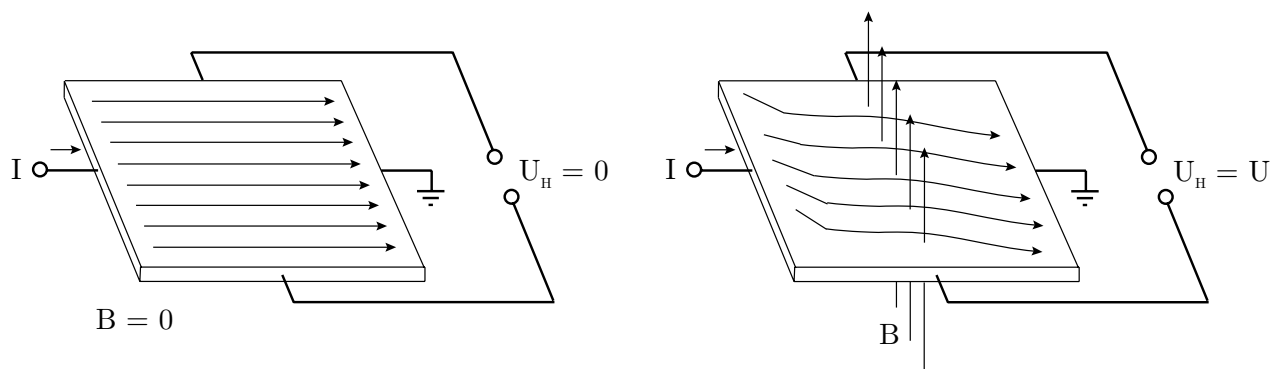


Abb. 4-8 Hall-Effekt

Prinzipbedingt werden nur die Feldkomponenten senkrecht zum Sensor erfasst. Das verwendete Messgerät „M-Test digital“ misst die magnetische Flussdichte in unterschiedlichen Messbereichen ($0 \dots 20 \dots 200 \dots 2000$ mT bei einer Genauigkeit von $\pm 1 \%$ vom Skalenendwert).

Für die Simulationen zur Magnetfeldanalyse wurde ein Modell mit der FEM-Software „Ansys“ erstellt. Die Vorgehensweise wird im nächsten Abschnitt detailliert dargestellt.

4.2.7 Massebestimmung der Targets

Für die Berechnung des Massenerosionskoeffizienten ist es notwendig, die Masse des Targets vor und nach jedem Versuch zu bestimmen. Dazu wurde eine Präzisionswaage der Firma Sartorius Modell „LC6200S“ mit einer Genauigkeit von ± 10 mg verwendet.

4.3 Vorüberlegungen zu Messgenauigkeit und Statistik

Bei allen Messungen sind die Messergebnisse mit Fehlern behaftet. Die Einschätzung von Messunsicherheiten stellt daher einen wichtigen Bestandteil der Versuchsauswertung dar. Man kann daraus auf die Aussagekraft der gewonnenen Versuchsergebnisse schließen. Entsprechend ihres Ursprungs kann man zwei Arten von Fehlern, die systematischen und die statistischen, unterscheiden.

Systematische Fehler treten z. B. auf, wenn fehlerbehaftete Messgeräte oder Bauelemente, ungünstige Messaufbauten o. ä. eingesetzt werden. Selbst die Verwendung von geeichten Messeinrichtungen führt zu Fehlern, da sie meist selbst mit dem zu untersuchenden Prozess in Wechselwirkung treten. Ein Merkmal von systematischen Fehlern ist die Möglichkeit, sie durch Korrekturen (Nullpunktabgleich, Vergleichsmessungen) auszugleichen, da wiederholte Messungen den gleichen Fehler in Betrag und Vorzeichen aufweisen. Dies betrifft insbesondere statische Fehler. Bei dynamischen Fehlern der Messeinrichtung kann man mit zeitlich veränderlichen Testsignalen (Sprungfunktion) diese erfassen und bewerten. Bei Messgeräten wird der mögliche systematische (relative) Fehler durch die prozentuale Angabe von Fehlertoleranzen für den Messwert gegeben.

Der statistische (zufällige) Fehler kann ein Messergebnis in beiden Richtungen (Abweichung in Betrag und / oder Vorzeichen) beeinflussen. Zur Beurteilung von statistischen Fehlern muss man mehrere Messungen heranziehen, bei denen die Versuchsbedingungen möglichst konstant gehalten werden. Bei sehr vielen Messungen, idealerweise unendlich vielen, ergeben die Messwerte eine Verteilung, die durch eine Gaußfunktion beschrieben werden kann.

$$W(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{(x - \langle x \rangle)^2}{2\sigma^2} \quad (4-3)$$

$W(x)$... Wahrscheinlichkeit, dass x als Messwert auftritt

$\sigma(x)$... Standardabweichung der Einzelmessung

$\langle x \rangle$... Erwartungswert von x

Die Größe $\sigma(x)$ gibt an, in welchem Bereich die Messwerte dabei um den Erwartungswert streuen. Bei einer unendlich langen Messreihe unter identischen Messbedingungen

würde man immer den gleichen Erwartungswert erhalten, der dann dem „wahren Wert“ der Messgröße entspräche. Da es in der Praxis jedoch keine unendlich langen Messreihen bzw. immer konstante Messbedingungen gibt, muss durch eine statistische Betrachtung ein Näherungswert vom Erwartungswert mit einem zugehörigen Zuverlässigkeitsgrad ermittelt werden. Mit den erhaltenen Stichproben einer Messung lassen sich durch verschiedene mathematische Funktionen diese Werte bestimmen. Eine Möglichkeit ist die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes und der zugehörigen Standardabweichung.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4-4)$$

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4-5)$$

x_i ... Messwert

n ... Anzahl der Messwerte

\bar{x} ... Mittelwert des Messwertes

Die Standardabweichung hängt dabei im Wesentlichen von den Messfehlern und der statistischen Verteilung der Messgröße ab.

In Rahmen dieser Arbeit waren eine Anzahl unterschiedlicher physikalischer Größen zu messen. Bei der Betrachtung der Fußpunktbewegung waren es zurückgelegte Wege, bei den Ionenstrommessungen entsprechende Sondenströme, bei den eigentlichen Schichtuntersuchungen die zugehörigen Schichtdicken, Dropletbelastungen und Härtewerte. Für jede dieser Messungen sollten je nach verwendeter Messtechnik und zu bestimmenden Größen unterschiedliche Fehlereinflüsse beachtet werden.

Bei der Betrachtung der Fußpunktbewegung wurden aus den Aufnahmen der Highspeed-Kamera die in bestimmten Zeitabschnitten zurückgelegten Wege gemessen. Es sollten daraus z. B. für die Fußpunkte die Geschwindigkeiten und die Ausbreitungswege in der Pulsphase des Bogenstromes sowie die Geschwindigkeit auf einer durch das Magnetfeld erzeugten Kreisbahn erfasst werden. Eine Einschränkung gerade bei Messungen an den Fußpunkten in der Pulsphase stellte die messsystembedingte geringe Anzahl von Einzelmessungen dar. Das verwendete Kamerasystem lieferte je nach Parametern des Bogenstromes nur 4 bis 5 Pulsphasen, für die jeweils vier Einzelbilder zur Verfügung standen. Im Vergleich dazu sind die berechneten Kreisbahngeschwindigkeiten z. B. über eine wesentlich größere Anzahl von Einzelbildern bestimmt worden und daher weniger

fehlerbehaftet.

Die Messungen zum Ionenstrom wurden mit Hilfe von Sonden realisiert. Hier spielte vor allem die Bewegung der Fußpunkte auf der Targetoberfläche eine Rolle. Durch die sich ständig ändernde Position der Fußpunkte zur Sonde und der damit verknüpften Änderung des Ionenstromes war eine möglichst große Messzeit zur Verringerung von Fehlern, die durch den Prozess selbst entstanden, erforderlich. Die elektrischen Messwerte wurde daher über eine Zeitraum von 1,25 s gemessen. Dadurch führten z. B. die Fußpunkte je nach Stärke des Magnetfeldes einige Zehn Umrundungen auf der Kreisbahn durch. Aus den so gewonnenen elektrischen Verläufen wurden dann die Mittelwerte, die Effektivwerte und die Maximalwerte bestimmt.

Eine wichtige Größe zur Bewertung der Schicht stellt die erzeugte Schichtdicke dar. Alle Proben wurden mit der Kalottenschliffmethode untersucht. Dabei wurden je Probekörper bzw. Messposition für die Bewertung des Schichtdickenprofiles mindestens drei Schiffe vermessen. Wenn einer der Einzelmesswerte abwich, wurden weitere Schiffe angefertigt und ausgewertet, um dadurch Messfehler möglichst klein zu halten. Die Messungen zur Schichthärte und zum E-Modul wurden vollautomatisch mit Hilfe des beschriebenen Nano-Test-Systems durchgeführt. Es wurden in einem Messvorgang 25 Einzelmessungen in einer vorgegebenen Messmatrix ($125 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$) durchgeführt. Der Messort sollte idealerweise ein homogener Bereich mit einer geringen Anzahl an Droplets sein. Während der Messungen blieben sogenannte „Ausreißer“ unberücksichtigt, wenn sie mehr als $\pm 5 \%$ vom mittleren Kurvenverlauf der restlichen Messpunkte abwichen. Nötigenfalls wurde eine weitere Messreihe aufgenommen.

Für die Bewertung der Droplettdichte einer Beschichtung sind pro beschichteter Stahlrunde jeweils fünf Aufnahmen mit 500facher Vergrößerung (ca. $115 \mu\text{m} \times 155 \mu\text{m}$) von Oberfläche angefertigt und ausgewertet worden. Von den erhaltenen Werten konnte dann innerhalb ihrer Größenkategorie der arithmetische Mittelwert gebildet werden.

5 Beeinflussung des Lichtbogens beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren durch statische Magnetfelder, eine Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren

5.1 Simulationen zum Magnetsystem

Für eine Simulation des Magnetsystems wurden als erstes Festlegungen zur verwendeten Anlagentechnik getroffen, um das Simulationsmodell geometrisch erfassen zu können. Aus den geometrischen Verhältnissen an der genutzten Beschichtungsanlage ergaben sich, die für die Simulation mit der FEM-Software „Ansys“ benötigten geometrischen Abmessungen des Targets und ein entsprechendes Simulationsgebiet (Abb. 5-1).

Für die Simulation spielten folgende Vorüberlegungen eine Rolle. Die Spots bewegen sich auf einer Spur, auf der die senkrechte (y -)Komponente der magnetischen Flussdichte null ist (siehe Abschnitt 3.4.2). Je größer der B -Gradient in diesem Bereich ist, desto „stabiler“ ist die Bahn der Spots. Die Beeinflussung der Fußpunkte erfolgt direkt auf der Targetoberfläche. Daher muss die y -Komponente der magnetischen Flussdichte auf der Targetoberfläche ermittelt werden (Abb. 5-1; Lösungspfad).

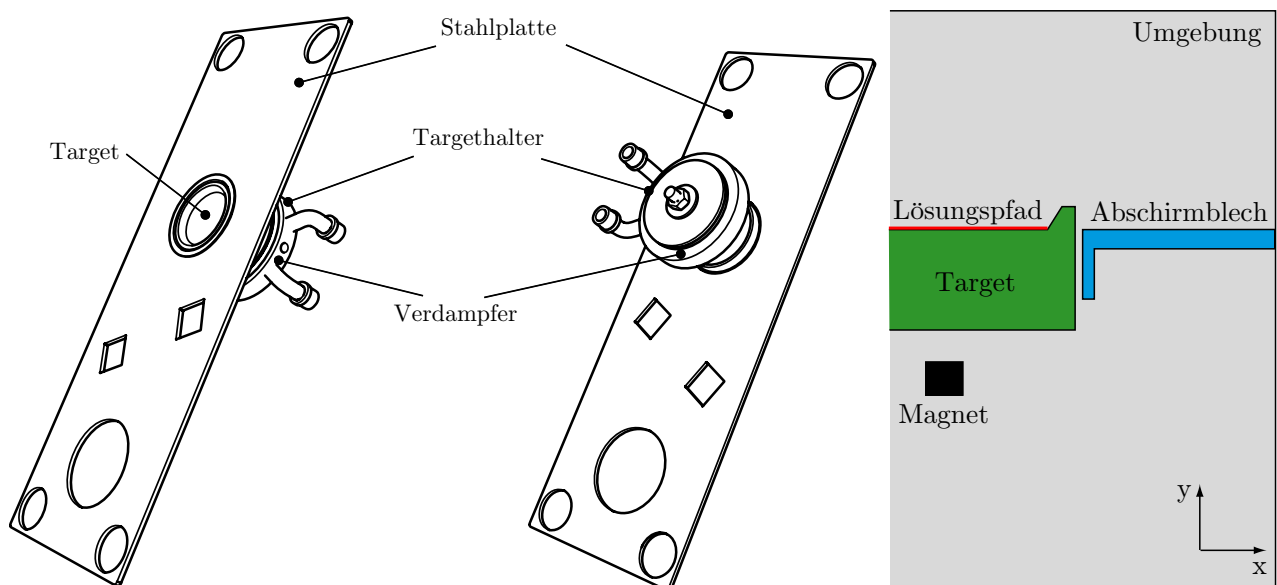


Abb. 5-1 Verdampferanordnung und das sich daraus ergebende Simulationsgebiet

Für eine gute Ausnutzbarkeit des Targets gibt es zwei mögliche Ansatzpunkte. Das Magnetfeld kann so geformt werden, dass der Ausgangspunkt des Fußpunktes beim Einsetzen der Bogenstrompulse auf dem halben Radius der Targetoberfläche liegt (Abb. 5-2a):

$$r_{Spot} = \frac{r_T}{2} \quad (5-1)$$

Dadurch haben die Fußpunkte zur Targetmitte und zum Targetrand die gleichen möglichen Wege zur Verfügung. Allerdings ist die zur Verfügung stehende Fläche für die Targeterosion unterschiedlich. Wenn man gleiche Flächen zur Verfügung stellen möchte, gilt folgendes (Abb. 5-2b):

$$r_{Spot} = \sqrt{\frac{r_T^2}{2}} \quad (5-2)$$

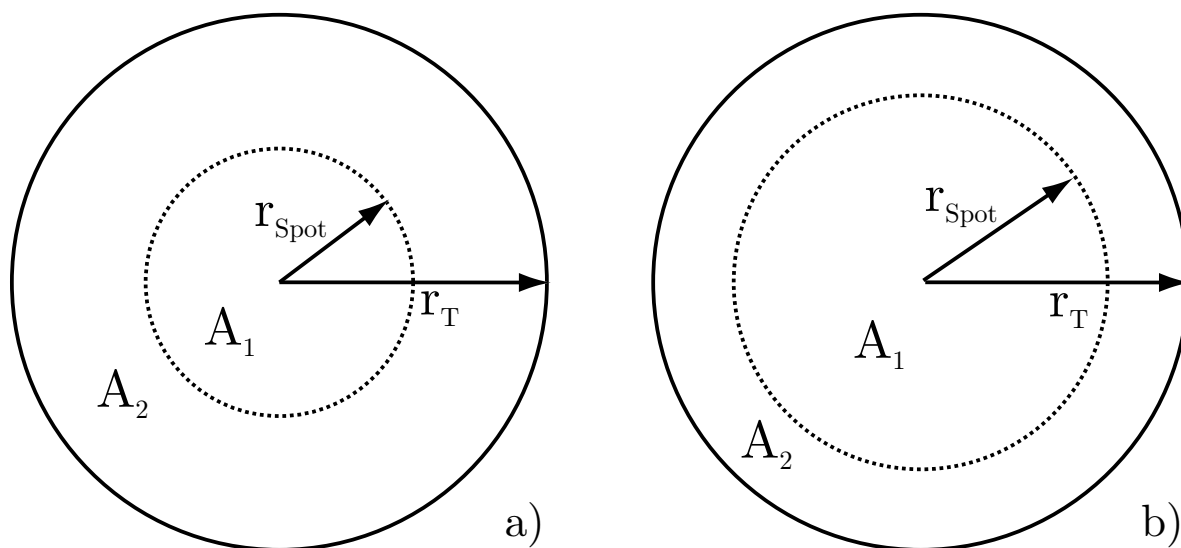


Abb. 5-2 Verschiedene Möglichkeiten der Spotbahn

Die Simulationen wurden für den statischen Fall ausgelegt, so dass die Abmessungen und Positionierung des Magneten bestimmt werden konnten. Dabei waren neben dem gewünschten r_{Spot} auch die konstruktiven Randbedingungen der Beschichtungsanlage zu berücksichtigen:

- Die Magnete sollen möglichst wenig vom für die Beschichtung benötigten Targetvolumen einnehmen und damit die Ausnutzung nicht zu stark einschränken. Daher müssen die Magnete möglichst weit von der Targetoberfläche entfernt sein.
- Die verwendeten industriellen Permanentmagnete gibt es in festgelegten Abstufungen ihrer Abmessungen. Es müssen Permanentmagnete für eine praktischen Umsetzung vorhanden sein.
- Die Targets verfügen über eine Schraubbefestigung in der Mitte. Dieser Bereich muss freigehalten werden.

Die für eine Simulation des Magnetfeldes wichtigen Komponenten sind in Abb. 5-1 dargestellt. Die Kammer selbst besteht aus Edelstahl und wird daher nicht berücksichtigt. Das Abschirmblech ist bei der Simulation zu berücksichtigen, da es aus Stahl besteht und somit die Ausbildung eines Magnetfeldes beeinflusst. Berechnet wurde jeweils der Verlauf der y-Komponente der magnetischen Flussdichte entlang des Lösungspfades an der Targetoberfläche (Abb. 5-1).

Es wurden systematisch alle möglichen Konstellationen des Magneten zur Targetoberfläche untersucht. Grundsätzlich sollte ein ringförmiger Magnet benutzt werden, da nur eine Kreisbahn auf dem runden Target das gewünschte Bewegungsverhalten erzeugen kann. Die Querschnittsfläche des Magneten wurde in Anlehnung an industriell erhältliche Magneten und aus Erfahrungen aus anderen Untersuchungen mit $10 \times 10 \text{ mm}$ angenommen. Die in der Simulation benutzte B-H-Kennlinie des Werkstoffes wurde in Anlehnung an den Magneten Nr.1 aus Tab. 5-1 in die Simulation eingegeben. Da es sich um eine qualitative Betrachtung der Magnetfeldverhältnisse handelte, war nur der qualitative Verlauf der Magnetfeldlinien und der sich daraus ergebende Nulldurchgang der y-Komponente der magnetischen Flussdichte von Interesse.

Die Veränderung des Durchmessers führt zu einer Verschiebung des Magneten in der horizontalen Ebene (x-Richtung). Eine Verschiebung in der vertikalen Ebene (y-Richtung) verändert den Abstand des Magneten zur Targetoberfläche.

Für die vorhandenen Targets mit $r_T = 50 \text{ mm}$ („erhöhter Targetrand“ $\Rightarrow r_T = 43 \text{ mm}$ war effektiv nutzbar) wurde zunächst der Einfluss des Abstandes zur Targetoberfläche bestimmt (Abb. 5-3 und Abb. 5-4). Es wurde B_y an der Targetoberfläche entlang des in Abb. 5-1 gezeigten Lösungspfades bestimmt. Da die Spots sich auf einer Spur bewegen, auf der die y-Komponente der magnetischen Flussdichte null ist, mussten die Stellen ermittelt werden, an denen dies der Fall ist. In der Abb. 5-3 ist zu erkennen, dass es keinen Nulldurchgang von B_y innerhalb von $r_T = 50 \text{ mm}$ gibt, solange man sich

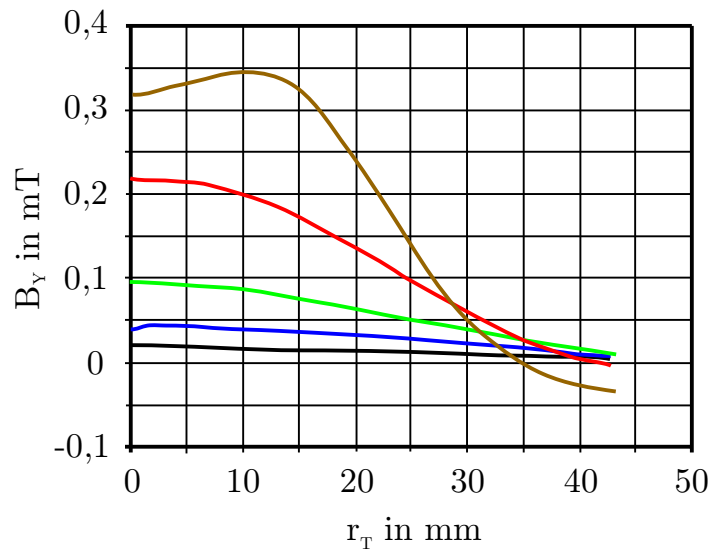
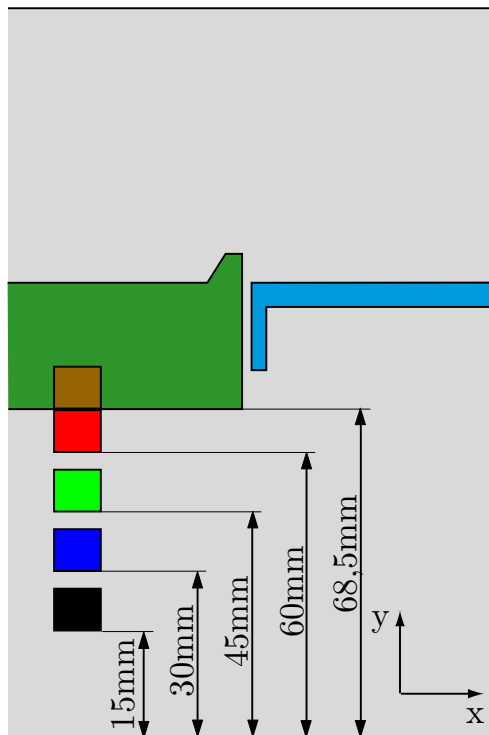


Abb. 5-3 Einfluss des Abstandes des Magneten von der Unterseite des Targets

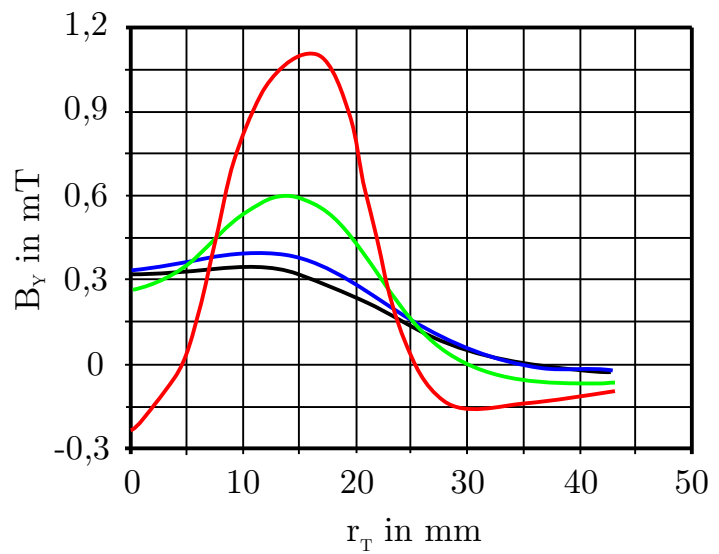
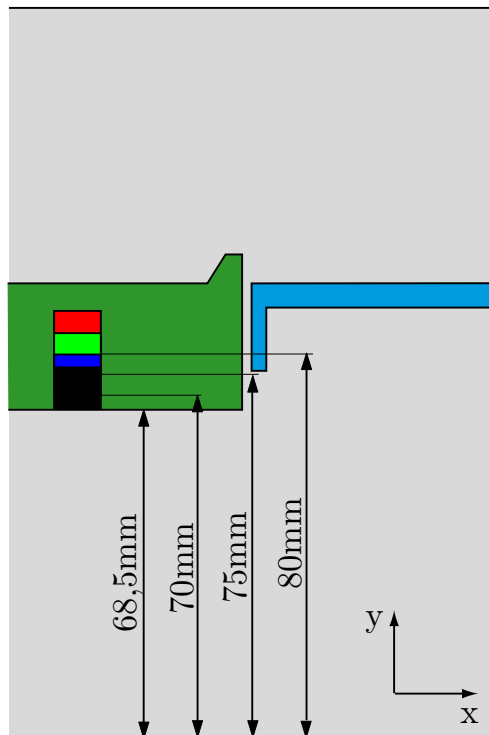


Abb. 5-4 Einfluss des Abstandes des Magneten von der Targetoberfläche

außerhalb des Targets befindet. Erst wenn man den Magneten in das Target selbst verschiebt, stellt sich ein Nulldurchgang von B_Y ein. In der Abb. 5-4 ist innerhalb des Targets eine weitere Verschiebung in Richtung Oberfläche dargestellt. Wenn man sich der Oberfläche zu weit annähert, hat es einen zweiten Nulldurchgang von B_Y (Abb. 5-4, rote Kurve) zur Folge. Das ist für eine Festlegung der Spotbahn nicht akzeptabel, da man zwei mögliche Bahnen erhält, auf denen sich die Fußpunkte bewegen könnten. Unter Berücksichtigung der praktischen Nutzbarkeit des Targets folgte die Festlegung, dass der Magnet auf der Targetunterseite zumindest innerhalb des Targets platziert werden musste. Dies stellte einen Kompromiss zu den gegebenen konstruktiven Bedingungen und der verfügbaren Magneten dar.

Der Einfluss des Magneten in Bezug auf seine horizontale Lage wurde als nächstes simuliert (Abb. 5-5). Je weiter man den Magneten zum Targetrand verschiebt (Vergrößerung der Magnetringdurchmesser), um so weiter verschiebt sich auch der Nulldurchgang von B_Y nach außen. Bei Verwendung des Permanentmagneten ergeben sich durch die Ausbildung des Magnetfeldes zwei mögliche Nulldurchgänge von B_Y (innen und außen), die durch eine horizontale Verschiebung beeinflusst werden. In der Abb. 5-5 ist es bei der schwarzen und blauen Kennlinie der „äußere“ Magnetfeldanteil, bei dem B_Y durch null verläuft. Bei den anderen drei Kurven ist es dann der „innere“ Anteil des Magnetfeldes bei dem B_Y durch null verläuft.

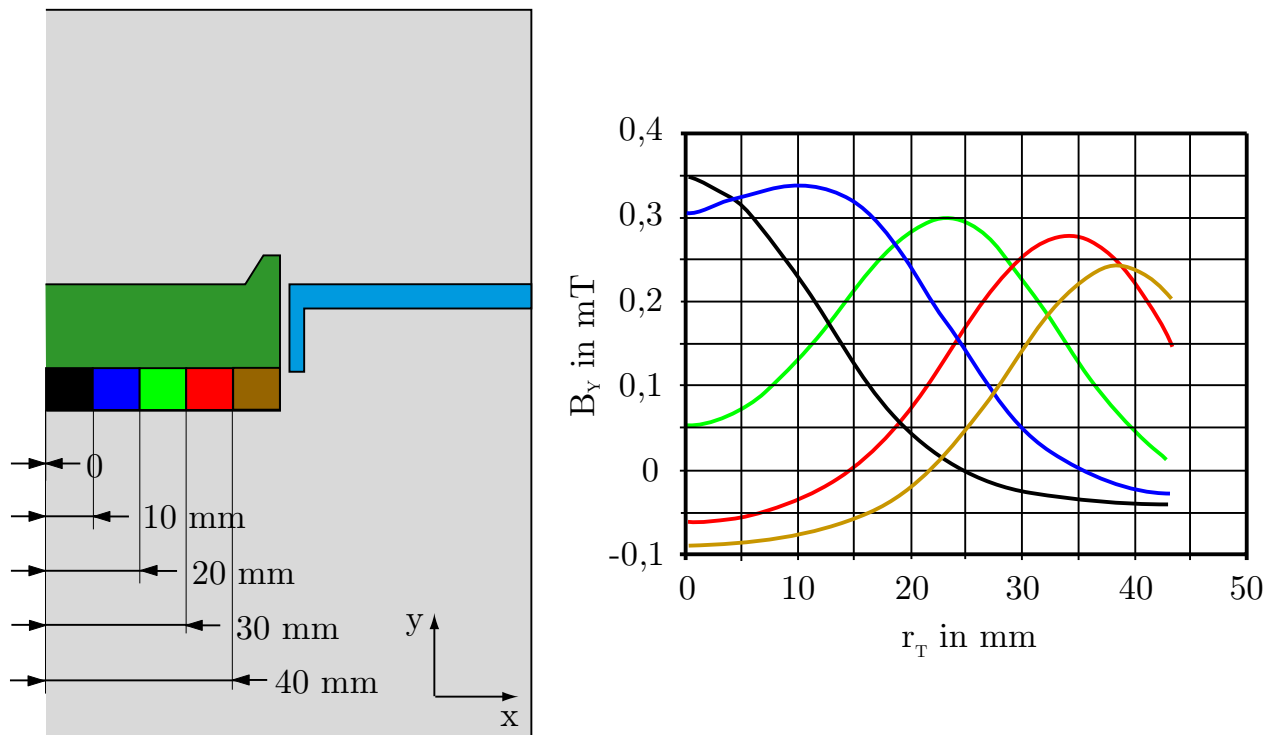


Abb. 5-5 Einfluss der Lage des Magneten innerhalb des Targets

Wenn man eine Targetausnutzung entsprechend der Bedingung der Gleichung (5-1) erreichen will, müsste der Magnet in der Mitte (ohne Bohrung) angebracht werden (Abb. 5-5, schwarze Kennlinie). Da an dieser Stelle aber die Befestigung des Targets erfolgen muss, wurde die Position, die der blauen Kennlinie in Abb. 5-5 entspricht, ausgewählt. Dadurch ergab sich ein r_{Spot} von 35 mm. Das entspricht der Bahn, die man bei der Berechnung nach Gleichung (5-2) für $r_T = 50$ mm erhält und ist für einen flächenbezogenen gleichmäßigen Abtrag des Targets günstiger. Die Nutzung des „inneren“ Anteils des Magnetfeldes und damit eine Erfüllung der Bedingung nach Gleichung (5-1) würde es erfordern, den Magnetring größer als das Target selbst zu wählen. Das ist aus materiellen (Verfügbarkeit derartiger industrieller Magnete) und konstruktiven (Verdampfergeometrie) Gründen nicht möglich.

Die letztendlich ausgewählten Magnete (siehe Tab. 5-1) besitzen einen minimalen Innenradius von 9,5 mm und einen maximalen Außenradius von 20,5 mm. Sie sind damit für die festgelegte Position geeignet und entsprechen den in der Simulation verwendeten Parametern. Die resultierenden Abmessungen des Magneten und seine Position kann der Abb. 5-6 entnommen werden.

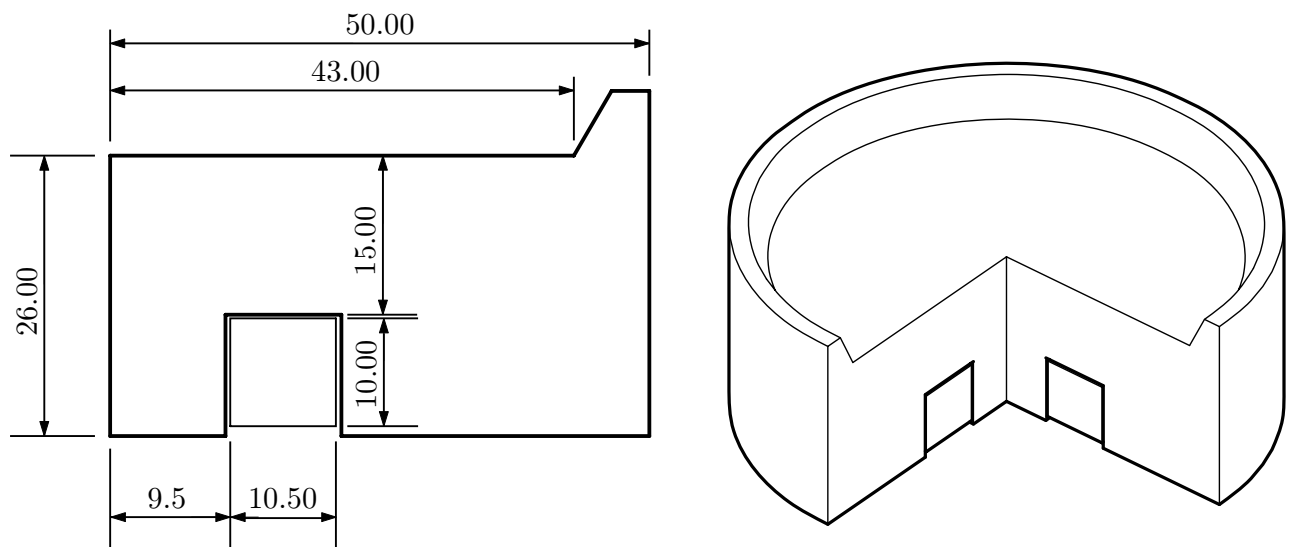


Abb. 5-6 Abmessungen und Lage des Magneten innerhalb des Targets

Nach der Bestimmung der Form und der Abmessungen des Magneten und der genauen Position im Target wurden die Targets an den entsprechenden Stellen ausgefräst. Durch das Ausfräsen hat sich die effektive Auflagefläche und damit die zur Kühlung des Targets notwendige Oberfläche um ca. 12,5 % verringert. Da mit den elektrischen Parametern der maximale Effektivwert des Bogenstromes für das Target nicht

überschritten wurde und ein Kühlgerät zur Verfügung stand, mit dem die Kühlung des Targets auf eine konstante Temperatur von 7 °C garantiert werden konnte, war eine thermische Überlastung des Verdampfers ausgeschlossen.

Um den Einfluss der Magnetflussdichte untersuchen zu können, wurden zwei unterschiedliche, industriell gefertigte Ringmagnete eingesetzt. In Tab. 5-1 sind einige Parameter zu diesen Magneten aufgeführt.

Tab. 5-1 Parameter zu den verwendeten Permanentmagneten

Nr.	Außen- durchmesser in mm	Innen- durchmesser in mm	Höhe in mm	Gewicht in g	Hubkraft in N	Werkstoff
1	41,0	22,0	9,0	41,0	22,0	HF26/24
2	40,0	19,0	10,0	49,6	48,0	SmCo 55/60p

Es wurde festgestellt, dass der Magnet mit geringerer Magnetflussdichte (Tab. 5-1, Nr.1) besser geeignet war, als der Magnet mit höherer Magnetflussdichte (Tab. 5-1, Nr.2). Die Fußpunkte hielten bei Nutzung des Magneten mit geringerer Magnetflussdichte die Kreisbahn während der Grundstromphase ein und konnten sich während der Impulsphase ausbreiten. Eine höhere Magnetflussdichte schränkte die Bewegungsfreiheit für das Auseinanderstreben der Fußpunkte ein.

5.2 Prozessuntersuchungen mit der Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren

5.2.1 Fußpunktbewegung

Die Untersuchung der Fußpunkte wurde durch Hochgeschwindigkeitsaufnahmen ermöglicht. Ziel war es dabei, für die Verfahrenskombination Referenzwerte für spätere Vergleiche zu gewinnen.

Es wurden in erster Linie die Art der Bewegung und dabei auftretende Geschwindigkeiten der Fußpunkte betrachtet. Dazu wurde die Bewegung der Fußpunkte vermessen, wie schon in Abschnitt 4.2.4 dargestellt ist. Die auf diese Weise bestimmten Werte zu den Fußpunktgeschwindigkeiten sind im Anhang in Tab. A1 zusammengestellt. Die Abb. 5-7 zeigt ein Beispiel für einen Vergleich von Random-Arc- und Steered-Arc-Prozess bei gleichem Bogenstrom auf unterschiedlichen Targetmaterialien.

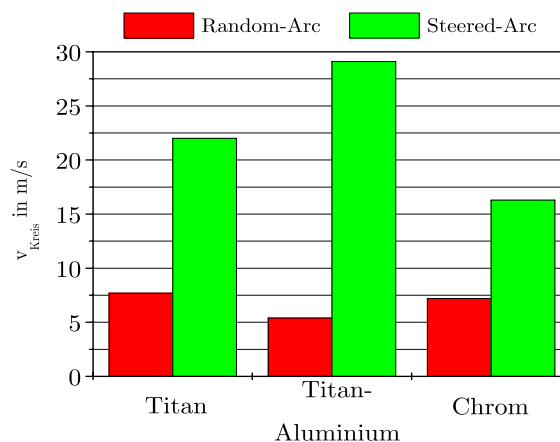


Abb. 5-7 Vergleich von Fußpunktgeschwindigkeiten für einen Random-Arc- und einen Steered-Arc-Prozess auf unterschiedlichen Targetmaterialien ($I_{DC} = 120 A$, $p = 1 Pa$, N_2)

Den Werten kann entnommen werden, dass beim Steered-Arc im Vergleich zum Random-Arc je nach Targetmaterial und Bogenstrom bis zu viermal höhere Fußpunktgeschwindigkeiten erreicht werden. Aus den daraus resultierenden kürzeren Verweilzeiten der Fußpunkte an einer Position auf der Targetoberfläche lässt sich z. B. die Verringerung der Droplets erklären. Da es zu weniger lokalen Überhitzungen und weniger großen Aufschmelzungen auf der Katodenoberfläche kommt, aus denen Droplets

gebildet werden könnten, ist eine Verringerung der Droplets auf der Substratoberfläche zu erwarten [068]. Untersuchungen diesbezüglich folgen im Abschnitt 5.2.5.

Beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren konnte man je nach den eingestellten Pulsparametern ebenfalls eine Erhöhung der Fußpunktgeschwindigkeiten im Vergleich zum Random-Arc beobachten. Gemessen wurden hier die Geschwindigkeiten, die während der Impulsphase erreicht wurden (Tab. A1; siehe auch [069, 070]).

Der Einsatz einer Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren ist durch die Verwendung eines gepulsten Bogenstromes unter Magnetfeldeinfluss (Permanentmagnet) gekennzeichnet. Dies bewirkte eine beschleunigte Bewegung der Subspots von der durch den Permanentmagneten vorgegebenen kreisförmigen „DC-Spur“ aus. Das Auseinanderstreben der Fußpunkte während der Impulsphase wurde durch die kreisförmige „DC-Spur“ überlagert. Es kam zu Veränderungen der Bahn und der Geschwindigkeiten der einzelnen Fußpunkte.

Die aus dem Einsatz des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens resultierende expandierende Ringstruktur [014, 071] der entstehenden Fußpunkte während der Impulsphase (Abb. A1a und Abb. A3a) wurde durch die Verfahrenskombination von einer Bewegung der Fußpunkte auf einer Kreisbahn überlagert. Es war bei Titan und Chrom als Targetmaterial ein „fächerförmiges“ Auseinanderstreben der Fußpunkte in die Bewegungsrichtung der vorherigen kreisförmigen „DC-Spur“ zu beobachten (Abb. A1b und Abb. A3b). Dieses wurde auch von Fuchs beobachtet [072]. Das dort beschriebene Verlöschen der Subspots kann auch hier bestätigt werden. So existierte nach einem Stromimpuls immer derjenige Subspot weiter, der sich auf der Kreisbahn am weitesten vorn befand. Da sich die Fußpunkte fächerförmig auf der Kreisbahn bewegten, wurde die Fläche, auf der ein Abtrag stattfindet, verkleinert.

Aus Tab. A1 geht hervor, dass sich die Geschwindigkeiten bei der Verfahrenskombination im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren erhöhten (Abb. 5-8). Die gemessenen Geschwindigkeiten der Spots bei der Verfahrenskombination sind bei Titan und Chrom mit den jeweiligen Geschwindigkeiten bei reinem Steered-Arc vergleichbar.

Auffallend war ein abweichendes Verhalten bei Titan-Aluminium als Targetmaterial (Abb. A2a und b). Es zeigte sich eine großflächige Ausbreitung der Fußpunkte, die sich schnell (bis zu 73,3 m/s gemessen) und trotz des Magnetfeldeinflusses unregelmäßig bewegten. Dabei wurde die Kreisbahn auf der Targetoberfläche nicht immer eingehalten. Makroskopisch betrachtet, schienen die einzelnen Fußpunkte auf der Oberfläche zu „springen“. Es konnten daher anhand der Videoaufnahmen nicht alle Geschwindigkeiten für dieses Material bestimmt werden. Die gemessenen Geschwindigkeiten der Spots bei

der Verfahrenskombination sind für Titan-Aluminium höher als bei reinem Steered-Arc. Die Stromimpulse unter Magnetfeldeinfluss beschleunigen im Gegensatz zum Titan oder Chrom die Spots auf der Titan-Aluminium-Oberfläche.

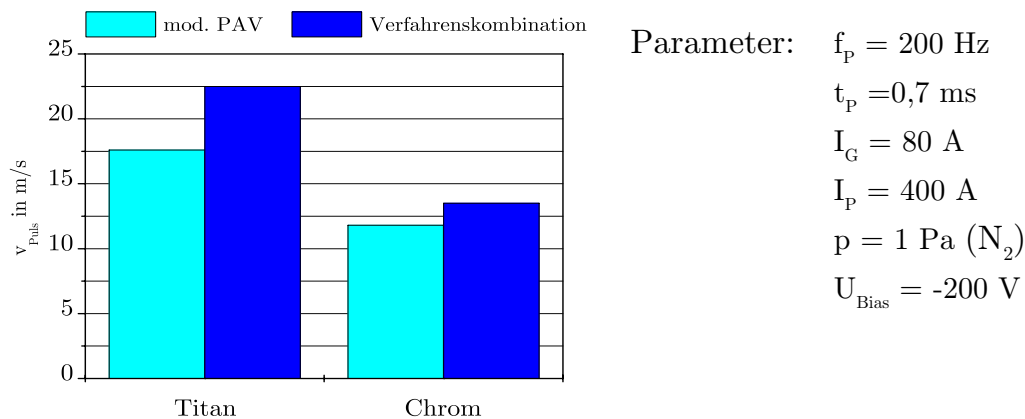


Abb. 5-8 Vergleich von Fußpunktgeschwindigkeiten für einen modifizierten Puls-Arc-Prozess und die Verfahrenskombination

Man kann sagen, dass der Einsatz der Verfahrenskombination eine beschleunigte Bewegung der Spots, alternierend um die durch den Permanentmagneten erzeugte kreisförmige „DC-Spur“, bewirkte. Durch eine Erhöhung der Geschwindigkeiten der Fußpunkte und damit einer Vermeidung lokaler Überhitzungen werden Vorteile für die Reduzierung der Droplets bei der Verfahrenskombination im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren erwartet.

5.2.2 Ionenstrom und Ionenstromverteilung

Die Messung des Ionenstromes erfolgte mit Hilfe von drei Sonden, die räumlich zum Target angeordnet waren (Abb. 4-3). Die Sonden bestanden aus Edelstahl und hatten jeweils eine Fläche von 1 cm^2 . Sie wurden auf eine Messspannung von -100 V bezogen. Die einzelnen Sonden befanden sich bei den Messungen jeweils 140 mm vom Zentrum des Targets entfernt. Andere Arbeiten gehen in diesem Zusammenhang auch auf Mehrfachladungen der Metallionen ein [073, 074]. Dies war jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Tab. A2 zeigt einen Vergleich von Mittelwerten des Ionenstromes für die untersuchten Prozesse. Hier wurde als Erstes für alle drei Targetmaterialien das Random-Arc-Verfahren mit dem modifiziertem Puls-Arc-Verfahren verglichen. Für die dargestellten

Prozesse wurde der Bogenstrom so gewählt, dass sein Mittelwert ca. 120 A betrug, um einen Vergleich zu ermöglichen. Als erstes erkennt man die aus anderen Untersuchungen bekannte Erhöhung des Ionenstromanteiles bei Verwendung gepulster Plasmen im Vergleich zum DC-Betrieb [041, 043, 075]. Bei Verwendung eines Titan-Targets stieg dieser Anteil um ca. 50 % senkrecht über der Katode. Nach außen hin nahm die Steigerungsrate ab, was auf die Fokussierung der Plasmasäule zurückzuführen ist. Die Steigerung des Ionenstromes zeigte eine Abhängigkeit vom verwendeten Targetmaterial. So fiel die Erhöhung bei Verwendung eines Chromtargets am größten aus. Es folgte dann Titan und anschließend Titan-Aluminium.

Desweiteren ist in der Tab. A2 ein Vergleich vom DC-Betrieb mit und ohne Magnetfeldeinfluss dargestellt. Es kam zu einer Verringerung des Mittelwertes des Ionenstromes bei Einsatz eines Magnetfeldes. Es wurde beobachtet, dass senkrecht über dem Target die Abnahme des Mittelwertes des Ionenstromes am größten ist. Nach außen hin wird die Abnahme geringer. Bei Verwendung von Titan war an der Sonde 45° sogar eine kleine Erhöhung (0,6 %) messbar. Dies ist auf die gerichtete Kreisbewegung durch das Magnetfeld zurückzuführen. Unter Magnetfeldeinfluss bewegen sich die Fußpunkte auf einer Kreisbahn mit einem r_{Spot} von 35 mm (Abstand zum Targetmittelpunkt) und damit verringert sich der Abstand zur Sonde mit 45° . Die Ionendichte weist eine Kosinus-Verteilung auf und ist dem Kehrwert des Abstandes zum Quadrat proportional [047, 055, 076, et al.]:

$$n_z(\vartheta, r) = C \cdot \frac{I}{r^2} \cdot \cos \vartheta \quad (5-3) \quad \text{mit} \quad C = 10^{13} \cdot \frac{f^Z}{\bar{Z}}; [C] = [A^{-1} \cdot m^{-1}] \quad [077]$$

n_z ... Dichte der Ionen mit Ladungszahl z

ϑ ... Winkel zur Katodensenkrechten

r ... Abstand vom Spotzentrum

f^z ... Anteil der Ionen mit Ladungszustand Z

\bar{Z} ... mittlere Ionenladung

Der Zusammenhang zwischen Ionendichte und Ionenstromdichte ergibt sich wie folgt:

$$j_i = n_i \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T_e}{m_i}} \quad (5-4)$$

j_i ... Ionenstromdichte
 n_i ... Ionendichte
 k ... Boltzmann-Konstante
 T_e ... Elektronentemperatur
 m_i ... Ionenmasse

Der Ionenstrom steigt daher schon bei kleinen Änderungen des Abstandes zu einer Sonde an (siehe auch Abb. 4-3b).

In Abb. 5-9 ist der zeitabhängige Verlauf des Ionenstromes bei DC-Betrieb und ohne Magnetfeldbeeinflussung an einem Beispiel dargestellt. Die Verläufe des Ionenstromes spiegeln die stochastische Bewegung der Fußpunkte wider.

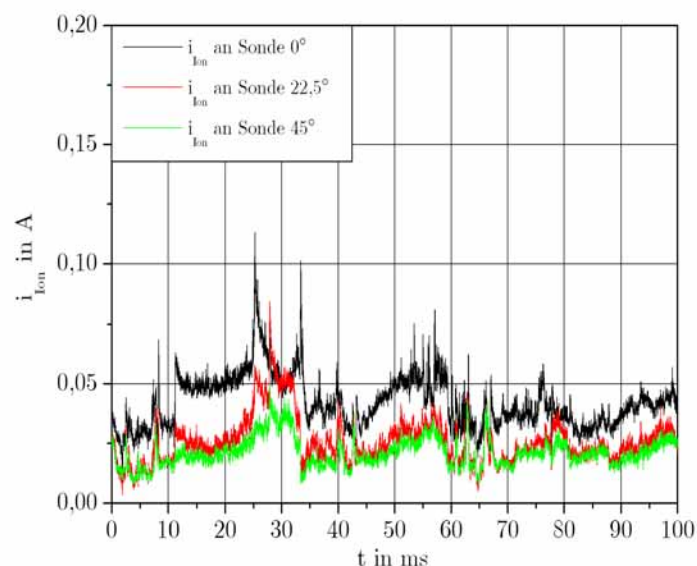


Abb. 5-9 Beispiel eines Ionenstrom-Verlaufes bei DC-Betrieb ohne Magnetfeldbeeinflussung (Titan-Target; $I_{DC} = 140$ A; $U_{Bias} = U_{Sonde} = -100$ V; $p = 1$ Pa, N_2)

Im Vergleich dazu ist in Abb. 5-10 der Ionenstromverlauf bei vergleichbaren elektrischen Parametern unter Magnetfeldbeeinflussung zu sehen. An den einzelnen Sonden bildet sich dabei deutlich die Frequenz der Kreisbewegung der Fußpunkte ab. In diesem Fall betrug sie ca. 80 Hz. Auch hier ist das Verhalten abhängig vom verwendeten Targetmaterial. Für Titan und Titan-Aluminium ist die Abnahme des Mittelwertes des Ionenstromes ähnlich (-30 bis -37 % an Sonde 0°) und für Chrom höher (ca. -52 % an Sonde 0°).

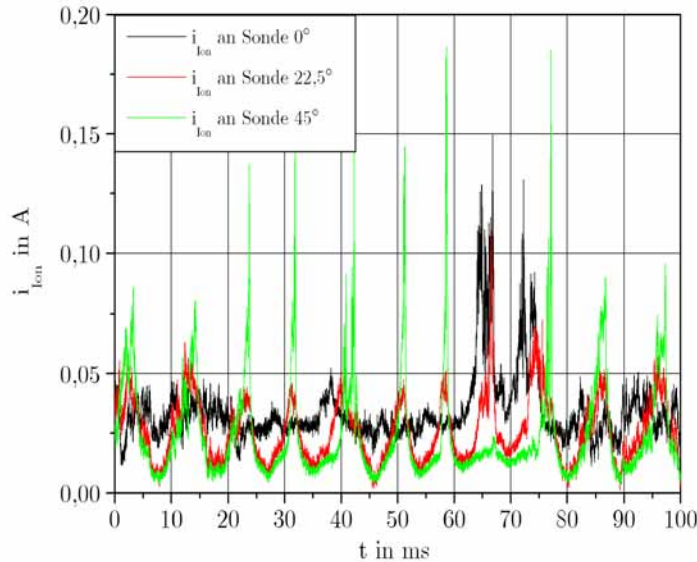


Abb. 5-10 Beispiel eines Ionenstrom-Verlaufes beim Steered-Arc
 (Titan-Target; $I_{DC} = 140 \text{ A}$; $U_{Bias} = U_{Sonde} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Tab. A3 zeigt auf die gleiche Weise einen Vergleich von Maximalwerten des Ionenstromes für die untersuchten Prozesse. Dabei zeigten sich beim Vergleich von DC-Betrieb und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren teilweise erhebliche Abweichungen. Die Messung der Maximalwerte mit den Einzelsonden wurde sehr stark durch die Position der Fußpunkte auf dem Target beeinflusst. Es entstanden einzelne Spitzen des Ionenstromes während der Messung. Hier kam wieder der Zusammenhang vom Abstand der Fußpunkte zu den Sonden und dem daraus resultierenden Ionenstrom zum Tragen. Es ist eine Steigerung der Maximalwerte des Ionenstromes an den Sonden 0° und $22,5^\circ$ zu erkennen.

Auch bei einem Vergleich von DC-Betrieb mit und ohne Magnetfeld ist die Position der Fußpunkte durch das Magnetfeld für die Abweichungen der Maximalwerte des Ionenstromes ausschlaggebend. Es wird aber deutlich, dass durch das verwendete Magnetfeld die Maximalwerte des Ionenstromes außen an der Sonde 45° ansteigen, da die Fußpunkte sich außen auf einer Kreisbahn bewegen.

Die Mittelwerte des Ionenstromes verringerten sich bei einem Vergleich der Verfahrenskombination mit einem Steered-Arc für Sonde 0° und Sonde $22,5^\circ$. An der Sonde 45° wurde jedoch eine Steigerung des Mittelwertes des Ionenstromes (bis zu 17 % bei einem TiAl-Target) beobachtet. Dies lies den Schluss zu, dass sich durch die Verfahrenskombination die Emissionscharakteristik des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens veränderte. Die beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren stattfindende

Fokussierung des Plasmas wurde durch das Magnetfeld abgeschwächt. Dies ist auf die durch das Magnetfeld veränderte Bahn der Fußpunkte zurückzuführen. Sie werden durch das Magnetfeld nach außen auf eine Kreisbahn gezwungen. Auch die folgenden Untersuchungen weisen darauf hin.

Eine Betrachtung des Mittelwertes des Ionenpulsstromes ist in Tab. A4 aufgezeigt. Die Mittelwertbildung erfolgte nur für die Pulsphasen. Bei einer Kombination vom Steered-Arc mit dem modifizierten Puls-Arc-Verfahren zeigte sich ebenfalls eine grundlegende Änderung in der Emissionscharakteristik. Das modifizierte Puls-Arc-Verfahren führt zu einer Fokussierung des Plasmas und damit zu einem Ansteigen des Ionenstromes an der Sonde 0° . Durch das Magnetfeld verlagerte sich der Ausgangspunkt durch die Erzeugung einer kreisförmigen „DC-Spur“. Nach den Messungen erhielt man den größten Wert des Mittelwertes des Ionenpulsstromes unter Magnetfeldeinfluss an der Sonde 45° . Wenn man den Ionenstrom-Verlauf an dieser Stelle betrachtet, ist zu erkennen, dass der Verlauf an der Sonde 45° erhebliche Unterschiede in der Impulshöhe aufweist (Abb. 5-11). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Spots während der Messungen durch die Überlagerung der Bogenstromimpulse mit der Kreisbewegung eine ständig wechselnde Position zu den Sonden hat. Damit änderte sich, wie schon vorher erwähnt, der Abstand des Bogenstromimpulses zur Sonde und so auch die Höhe des gemessenen Ionenstromes. Im Ionenstromverlauf spiegelt sich daher die Umlauffrequenz

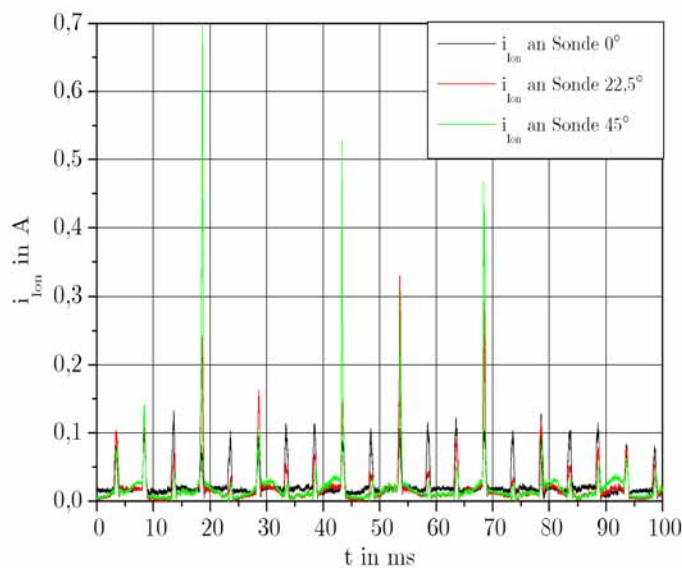


Abb. 5-11 Beispiel eines Ionenstrom-Verlaufes bei Kombination von Steered-Arc und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren (*Ti-Target*; $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $t_p = 0,6 \text{ ms}$; $f_p = 200 \text{ Hz}$; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

der magnetisch beeinflussten Fusspunkte wider.

Beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren ohne Magnetfeldeinfluss zeigen sich für die Ionenstromverteilung hingegen hauptsächlich Ionenstromanteile senkrecht über dem Target (Abb. 5-12). Die Sonde 0° zeigte durch die Plasmafokussierung die höchsten Werte im Ionenstromverlauf analog zu [014].

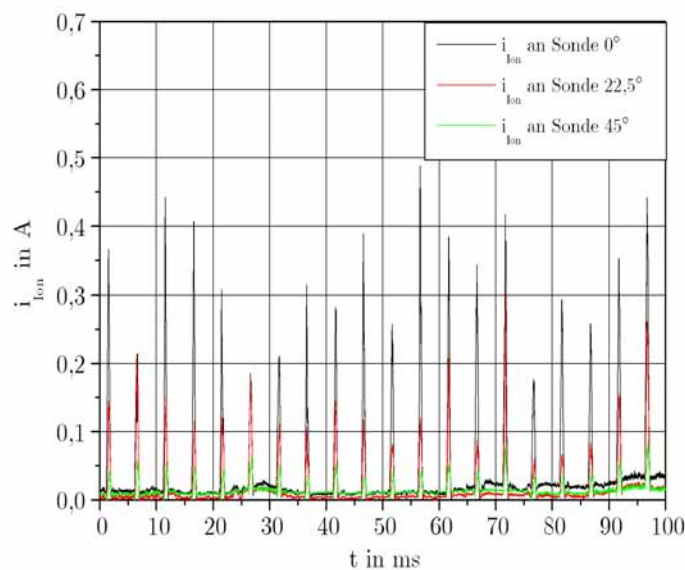


Abb. 5-12 Beispiel eines Ionenstrom-Verlaufes beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren (Titan-Target; $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $t_p = 0,6 \text{ ms}$; $f_p = 200 \text{ Hz}$; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Grundlegend ist bei einer Kombination vom Steered-Arc mit dem modifizierten Puls-Arc-Verfahren eine Änderung in der Emissionscharakteristik aufgetreten. Die durch das modifizierte Puls-Arc-Verfahren stattfindende Plasmafokussierung wurde durch die Kombination mit dem Steered-Arc-Verfahren abgeschwächt.

5.2.3 Beschichtungsrate und Schichtdickenverteilung

Die Tab. A5 beinhaltet einen Vergleich der Beschichtungsraten, der Massenerosionskoeffizienten und der Schichtdicken für den Random-Arc und das modifizierte Puls-Arc-Verfahren. Der Abstand des Substrats vom Target betrug jeweils 280 mm.

Bei Verwendung von Titan und Chrom zeigte sich für das Random-Arc-Verfahren der bekannte lineare Zusammenhang zwischen Beschichtungsrate und Mittelwert des Bogenstromes. Auch der Massenerosionkoeffizient spiegelte diese Verhältnisse

wider. Beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren wurde hingegen eine Steigerung der Beschichtungsrate von bis zu 45 % für Titan in Abhängigkeit von den verwendeten Pulsparametern beobachtet. Bei einem Chrom-Target konnte der doppelte Wert der Beschichtungsrate ermittelt werden. Diese Zunahme der Beschichtungsrate ist das Ergebnis der Plasma-Fokussierung durch die Bogenstromimpulse. Daher tritt der Maximalwert für die Beschichtungsrate in Analogie zur Ionenstromverteilung senkrecht über dem Target auf.

Beim Titan-Aluminium-Target wurde mit steigendem Bogenstrom während des Random-Arcs eine Abnahme der Beschichtungsrate beobachtet. Erklärbar ist dies durch ein verändertes Bewegungsverhalten der Fußpunkte auf der Targetoberfläche. So steigt die Geschwindigkeit der Fußpunkte mit steigendem Bogenstrom an. Hinzu kommen Zeitabschnitte, in denen die Fußpunkte kurzzeitig noch höhere Geschwindigkeiten erreichen (siehe auch Tab. A1) und so sehr kurze Verweilzeiten auf der Targetoberfläche aufweisen. Es wird daher weniger Target-Material verdampft.

Die Verwendung des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens zeigte in Abhängigkeit von den verwendeten Pulsparametern für ein Titan-Aluminium-Target eine mögliche Steigerung der Beschichtungsrate von bis zu 40 %.

Für die Bewertung der Beschichtungsraten wurden Tab. A5 und Tab. A6 miteinander verglichen. Für den Vergleich von Random-Arc und Steered-Arc zeigte sich erwartungsgemäß eine Abnahme der Beschichtungsrate (Titan => -23 %; Titan-Aluminium => -50 %; Chrom => -44 %).

Bei einem Vergleich des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens mit der Verfahrenskombination muss der veränderten Emissionscharakteristik Rechnung getragen werden. Für die Verfahrenskombination ergaben sich daher im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren senkrecht über dem Target kleinere Beschichtungsraten. Die bei anderen Arbeiten erreichten, leichten Steigerungen der Beschichtungsrate [078] konnten nicht bestätigt werden.

Die Betrachtung der Schichtdickenverteilung erbrachte neben einer Einschätzung des qualitativen Verlaufes der Schichtdicke auch eine Bewertung der Beschichtungsrate beim Einsatz größerer Substrate (22 cm x 2 cm). Im Gegensatz zu den Messungen mit den ansonsten für die Beschichtungen eingesetzten Ronden (Durchmesser: 22 mm), die sich mit ihrer relativ kleinen Fläche senkrecht über Target befanden, wirkte sich hier die Abschwächung der Fokussierung des Plasmas des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens durch die Kombination mit dem Steered-Arc stärker aus, da insgesamt über einen größeren Bereich beschichtet wurde.

In Abb. 5-13 und 5-14 sind die ermittelten Verläufe der Schichtdicke für TiN und CrN abgebildet.

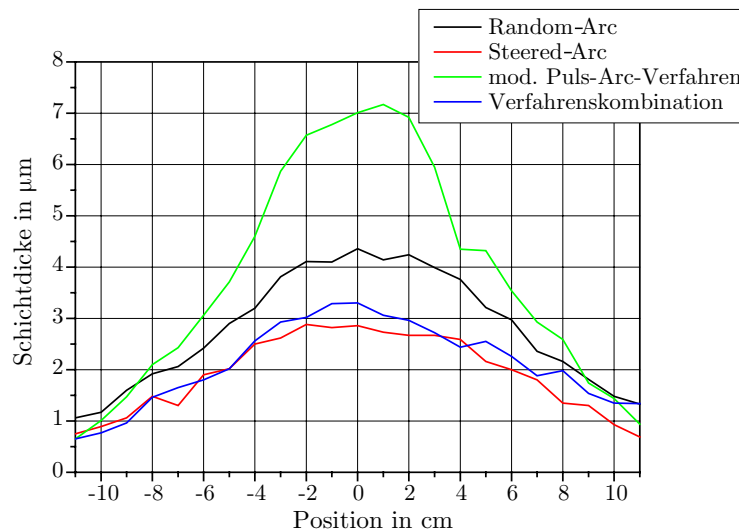


Abb. 5-13 Schichtdickenverteilung einer TiN-Beschichtung bei den verschiedenen Verfahren mit gleichem Mittelwert des Bogenstromes ($I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; Abstand Target-Substrat: 180 mm ; $t_{\text{Besch}} = 10 \text{ min}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

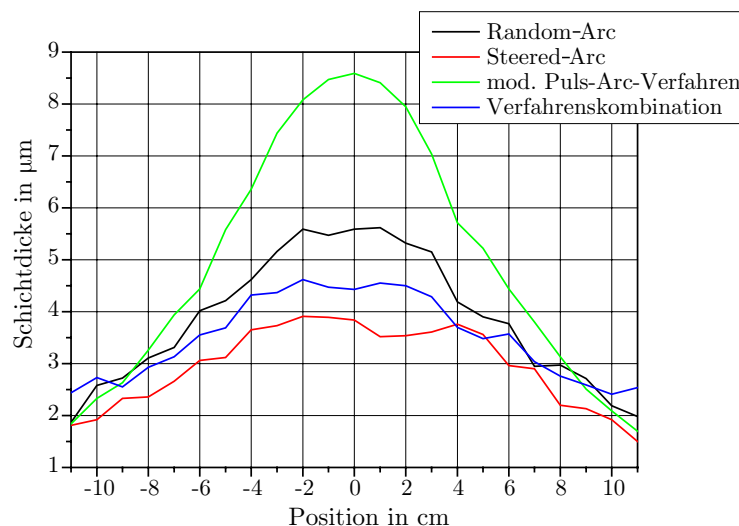


Abb. 5-14 Schichtdickenverteilung einer CrN-Beschichtung bei den verschiedenen Verfahren mit gleichem Mittelwert des Bogenstromes ($I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; Abstand Target-Substrat: 180 mm ; $t_{\text{Besch}} = 10 \text{ min}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Die Schichtdickenverteilung für die Verfahrenskombination (blaue Kurven) ähnelt qualitativ den Verläufen für den Steered-Arc. Die Fokussierung des Plasmas, die beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren typisch ist, wird durch die Wirkung des Magnetfeldes unterdrückt. Eine Vermessung der Schichtdicken zeigte für die Verfahrenskombination im Vergleich zum Steered-Arc eine Erhöhung der Beschichtungsrate (für TiN um ca. 9 % und für CrN um ca. 18 %).

Es konnte somit nachgewiesen werden, dass eine Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren zu einer Veränderung der Schichtdickenverteilung in Bezug auf die Betrachtung von Steered-Arc bzw. modifiziertem Puls-Arc-Prozess für sich allein führt. Eine Erhöhung der Beschichtungsrate für die untersuchten Substrate im Vergleich zum Steered-Arc konnte beobachtet werden.

Wie schon bei der Ionenstromverteilung festgestellt wurde, führte die Kombination des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens mit dem Steered-Arc zu einer Veränderung der Emissionscharakteristik des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens. Die starke Fokussierung des Plasmas wurde durch die Wirkung des Magnetfeldes abgeschwächt. Der Magnetfeldeinfluss drängte die Fußpunkte nach außen und die Beschichtungsrate senkrecht über dem Target nahm ab. Eine Vermessung der Schichtdickenverteilung bei großen Substraten unterstrich diese Feststellung.

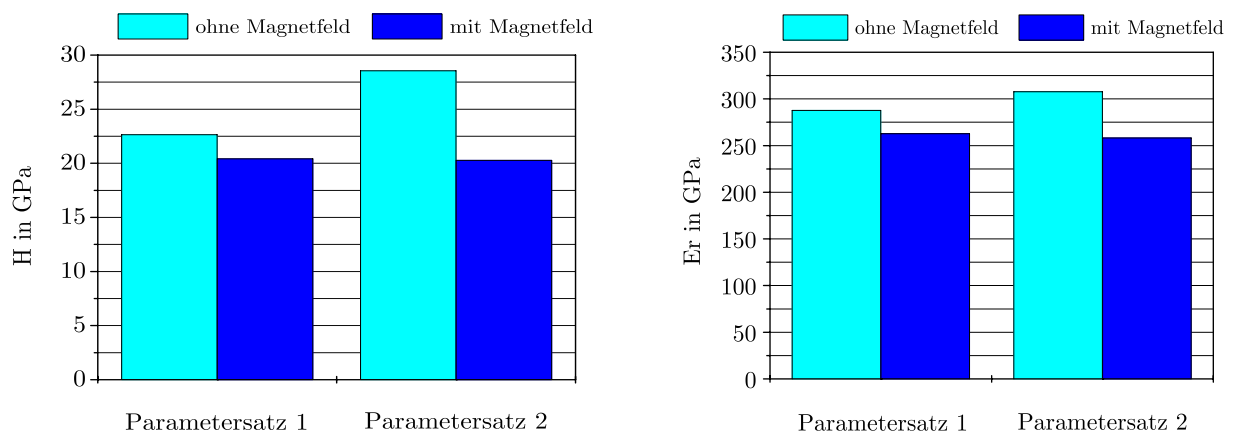
5.2.4 Schichthärte

In Tab. A7 sind die gemessenen Werte für die Schichthärte und das reduzierte E-Modul eingetragen. Die Messungen wurden mit Hilfe des in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Nano-Test-Systems durchgeführt. Dazu wurden je Probe 25 Messungen in einer vorgegebenen Messmatrix durchgeführt (Größe: $125\ \mu\text{m} \times 125\ \mu\text{m}$). Der Messort wurde nach vorheriger Betrachtung der Substratoberfläche festgelegt (idealerweise ein homogener Bereich ohne Droplets). Alle Beschichtungen wurden für die Vergleiche der unterschiedlichen Prozesse beim gleichen Arbeitsdruck ($p = 1\ \text{Pa}$) hergestellt, da der Stickstoffanteil in der Beschichtung die Härte beeinflusst [079, 080]. Auch die verwendete Biasspannung ($U_{\text{Bias}} = -200\ \text{V}$) war für alle Beschichtungen gleich, da sie die Härte und das E-Modul beeinflusst [081, 082]. Die Anwendung von Magnetfeldern bei PVD-Prozessen findet oftmals in Form eines Filtered-Arc statt (siehe auch Abschnitt 3.2.1). Dies beeinflusst die mechanischen Eigenschaften der Beschichtung positiv [083]. Auch der Einsatz gepulster Plasmen zeigt eine positive Beeinflussung der mechanischen Schichteigenschaften. So wurde an verschiedenen Stellen eine Verbesserung der Härte

durch den Einsatz gepulster Plasmen als Vorbehandlung [084] bzw. für die eigentliche Beschichtung [085] festgestellt.

Beim Steered-Arc zeigte sich im Vergleich zum Random-Arc-Prozess bei Verwendung eines Titan-Targets eine Erhöhung der Schichthärte bis zu 84 % und für ein Chrom-Target eine Erhöhung bis zu 30 %. Für Titan-Aluminium war keine eindeutige Tendenz sichtbar. So gab es einerseits Steigerungen der Härte bis 160 %, aber andererseits auch eine Abnahme der Härte um 30 % für andere Parameter des Bogenstromes. Die Oberflächenqualität der mit Titan-Aluminium beschichteten Substrate war außerdem durch Risse und Absätze in der Schichtstruktur gemindert. Die Ergebnisse waren nicht in jedem Fall reproduzierbar.

Aus Tab. A7 ist ersichtlich, dass die Werte für die Schichthärte beim Puls-Arc-Prozess bzw. der Verfahrenskombination je nach Targetmaterial und verwendeten Prozessparametern stark schwankten. Für zwei Beispiele einer Titan-Beschichtung sind die Härte und das E-Modul in Abb. 5-15 dargestellt. Bei Verwendung von Titan kam es für die Verfahrenskombination im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren zu einer Verringerung der Schichthärte (maximal -30 %, Abb. 5-15 - Parametersatz 2) und des reduzierten E-Moduls.



	f_p in Hz	t_p in ms	I_G in A	I_p in A	p in Pa	U_{Bias} in V	t_{Besch} in min
Parametersatz 1:	200	0,6	80	400	1 (N ₂)	-200	20
Parametersatz 2:	80	0,8	80	500	1 (N ₂)	-200	20

Abb. 5-15 Vergleich von Schichthärte und E-Modul von TiN-Beschichtungen, die bei einem modifizierten Puls-Arc-Prozess ohne bzw. mit Magnetfeld erzeugt wurden

Chrom als Targetmaterial führte hingegen zu einer Steigerung der Schichthärte (bis zu 167 %, Abb. 5-16 - Parametersatz 1). Das reduzierte E-Modul wurde ebenfalls erhöht. Auch die Verwendung von Titan-Aluminium hat bei der Mehrzahl der eingestellten Prozessparameter zu einer Steigerung der Schichthärte und des reduzierten E-Moduls geführt. Dabei ist jedoch zu bemerken, dass nur an ausgewählten Stellen der Oberfläche gemessen werden konnte, da die Oberflächenqualität nicht homogen war.

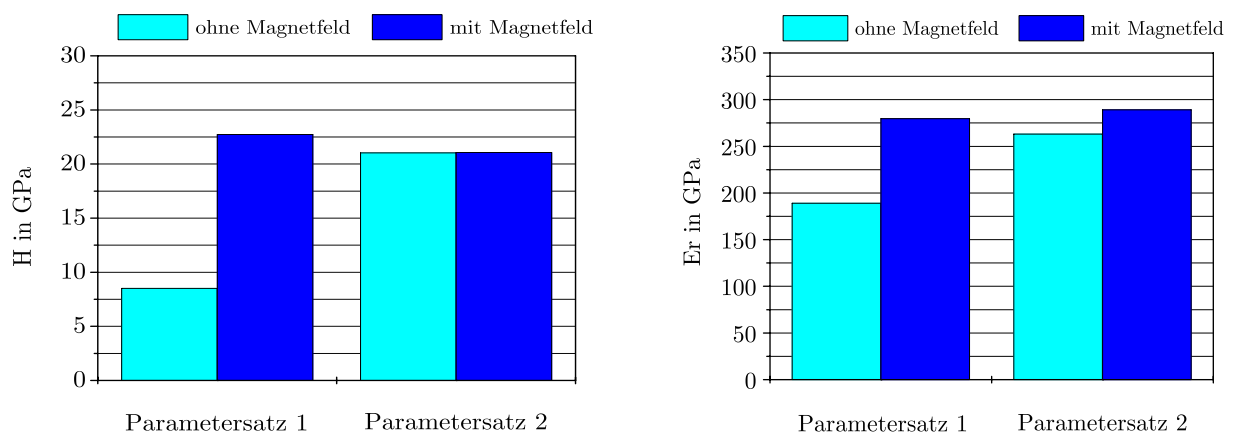


Abb. 5-16 Vergleich von Schichthärte und E-Modul von CrN-Beschichtungen, die bei einem modifizierten Puls-Arc-Prozess ohne bzw. mit Magnetfeld erzeugt wurden (Parameter siehe Abb. 5-15)

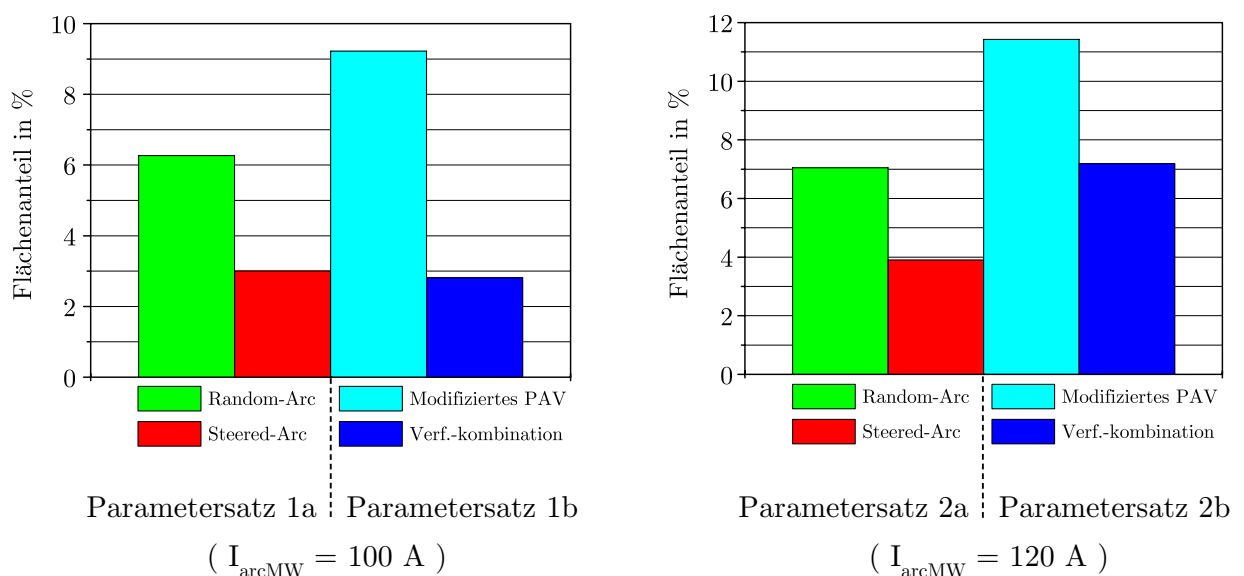
Zusammenfassend läßt sich feststellen, dass die Werte der Schichthärte je nach verwendetem Targetmaterial und Prozessparametern schwankten. Bei Verwendung von Titan als Targetmaterial kam es bei der Verfahrenskombination im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren zu einer Verringerung der Schichthärte. Für Chrom hingegen konnte eine Steigerung je nach verwendeten Pulsparametern beobachtet werden.

5.2.5 Dropletmission

Für die Bewertung der Droplets am Beispiel von CrN wurden von der Substratoberfläche Aufnahmen erstellt und gemäß Abschnitt 4.2.3 ausgewertet. Tab. A8 beinhaltet die Dropletanalyse der Beschichtung der Substrate mit CrN. Der Dropletanteil bei Verwendung des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens liegt im Gegensatz zu anderen Untersuchungen für die ausgewählten Parameter zum größten Teil über denen des

Random-Arcs. Es gab lediglich bei einer Einstellung einen geringeren Wert. Der Einsatz von gepulsten Prozessen verringert im Allgemeinen die Dropletmission im Vergleich zum Random-Arc. Dies wurde in anderen Arbeiten beobachtet [041; 043; 068]. Auch die verwendete Biasspannung hat einen Einfluss auf die Dropletmission [086]. Daher wurde die Biasspannung für diese Untersuchungen immer gleich groß gewählt ($U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$).

Die Auswertung der Droplets ergab, dass die Anwendung der Verfahrenskombination, wie auch der reine Steered-Arc-Prozess, keine Droplets größer als $10 \mu\text{m}$ erzeugt hat (Tab. A8). Der Flächenanteil der Droplets an der Gesamtoberfläche betrug beim Steered-Arc-Prozess im Vergleich zum Random-Arc meist weniger als die Hälfte (siehe auch [034]). Ein Vergleich der Verfahrenskombination mit dem modifizierten Puls-Arc-Verfahren zeigte ebenfalls eine Verringerung des Flächenanteils der Droplets (siehe auch [078]). Je nach gewählten Pulsparametern des Bogenstromes wurde durch Anwendung der Verfahrenskombination für Chrom als Targetmaterial der Dropletanteil bis auf ein Drittel verringert (Abb. 5-17 - Parametersatz 1).



	f_p in Hz	t_p in ms	I_G in A	I_p in A	p in Pa	U_{Bias} in V	t_{Besch} in min
Parametersatz 1a:	-	-	100	-	1 (N_2)	-200	20
Parametersatz 1b:	80	0,8	80	500	1 (N_2)	-200	20
Parametersatz 2a:	-	-	120	-	1 (N_2)	-200	20
Parametersatz 2b:	200	0,7	80	400	1 (N_2)	-200	20

Abb. 5-17 Dropletbewertung für zwei CrN-Beschichtungen bei unterschiedlichen Prozessen mit vergleichbarem Mittelwert des Bogenstromes

Selbst bei einem Vergleich der Verfahrenskombination mit dem Steered-Arc wurden je nach gewählten Pulsparametern teilweise geringere Dropletanteile ermittelt.

Zusammenfassend hat die Bewertung der Droplets ergeben, dass bei Anwendung der Verfahrenskombination, wie auch beim reinen Steered-Arc Prozess, keine Droplets größer als 10 μm entstanden sind. Je nach gewählten Pulsparametern wurde durch Anwendung der Verfahrenskombination die Dropletmission verringert.

5.2.6 Targetausnutzung

Nach den Beschichtungsversuchen war bei Verwendung des Permanentmagneten eine deutliche Spur auf den Targetoberflächen erkennbar (Abb. 5-18; da mit den Targets die jeweils gleichen Versuchsreihen gefahren wurden, sind sie vergleichbar). Besonders stark ausgeprägt war diese bei Chrom und Titan. Bei Titan-Aluminium strebten die Subspots weiter auseinander und führten trotz des Magnetfeldes eine sehr unregelmäßige Bewegung aus, die oft von der Kreisbahn in der DC-Phase abwich (siehe



Abb. 5-18 Targetoberflächen nach Beschichtungsversuchen ohne und mit Permanentmagnet

auch Abb. A2). Dementsprechend war die DC-Bahn auf der Targetoberfläche nicht so stark ausgeprägt, wie bei den anderen beiden Targetmaterialien.

Die Fußpunkte haben also während der Bogenstromimpulse die durch das Magnetfeld vorgegebene Kreisbahn kaum verlassen. Durch die verwendeten Tastverhältnisse des gepulsten Bogenstromes von 0,08 bzw. 0,17 findet ein großer Teil der Bewegung in der DC-Phase statt. Desweiteren konnten sich die Subspots im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren während des Bogenstromimpulses durch die Einwirkung des Magnetfeldes nicht ausbreiten. Die wirksame Erosionsfläche verkleinerte sich daher. Entgegenwirken könnte man diesem Verhalten auf verschiedenen Wegen. Zum einen würde eine Verringerung der Höhe des Grundstromes den Abtrag in der Grundstromphase reduzieren. Dies lässt sich jedoch nur bis zur Stabilitätsgrenze des Bogenstromes je nach verwendetem Targetmaterial realisieren. Eine Erhöhung der Pulsdauer kann die Spots ebenfalls weiter auseinanderstreben lassen. Dagegen spricht allerdings die dadurch auftretende Erhöhung des Effektivwertes des Bogenstromes.

Es gibt auch die Möglichkeit, den Permanentmagneten zu bewegen. Dies wird z. B. bei segmentierten Targets angewendet [087, 088].

Mit einem Permanentmagneten kann man die Magnetflussdichte nicht an einen gepulsten Prozess anpassen. Eine Schlussfolgerung daraus ist daher der Einsatz einer Magnetspule mit einer Stromversorgung, die sich an den gepulsten Prozess anpassen lässt. Eine solche wird im folgenden Abschnitt beschrieben und angewendet.

6 Beeinflussung des Lichtbogens beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren durch veränderliche Magnetfelder

6.1 Simulationen zum Magnetspulensystem

Die im Abschnitt 5.1 angestellten Überlegungen und vorgestellten Simulationen zum Einsatz eines Permanentmagneten für die Erzeugung des Magnetfeldes treffen im Wesentlichen auch für die Konstruktion einer Magnetspule zu. So kann man die Position der Spule im Simulationsprogramm in horizontaler und vertikaler Richtung in Bezug zur Targetoberfläche verschieben. Für die Simulation spielten also die gleichen Vorüberlegungen eine Rolle. Die Spots bewegen sich auf einer Spur, auf der die senkrechte (y -)Komponente der magnetischen Flussdichte null ist (siehe Abschnitt 3.4.2). Daher wurde in den Simulationen B_y auf der Targetoberfläche bestimmt. Ein Unterschied zu den Berechnungen mit dem Permanentmagneten bestand darin, dass der nach oben überstehende Rand des Targets nicht mehr berücksichtigt wurde. Damit stand für die Bewegung der Fußpunkte eine größere Fläche zu Verfügung.

Die für eine Simulation des Magnetfeldes wichtigen Komponenten entsprechen bis auf den entfernten Rand des Targets (nutzbarer Radius $r_T = 50 \text{ mm}$) denen, die in Abb. 5-1 dargestellt sind. Für die Simulation wurde der Querschnitt der Spule dem des Permanentmagneten (10 mm x 10 mm) gleichgesetzt. Es wurden 38 Windungen und ein Spulenstrom von 8 A verwendet (Werte aus Voruntersuchungen). Dann wurden wieder systematisch alle möglichen Konstellationen der Spule zur Targetoberfläche untersucht. Die Veränderung des Durchmessers führte zu einer Verschiebung der Spule in der horizontalen Ebene (x -Richtung). Eine Verschiebung in der vertikalen Ebene (y -Richtung) veränderte den Abstand der Spule zur Targetoberfläche.

Es wurde B_y an der Targetoberfläche entlang des in Abb. 5-1 gezeigten Lösungspfad bestimmt. Da die Fußpunkte sich auf einer Spur bewegen, auf der die y -Komponente der magnetischen Flussdichte null ist, mussten die Stellen ermittelt werden, an denen dies der Fall ist. In der Abb. 6-1 ist zu erkennen, dass es erst einen Nulldurchgang von B_y innerhalb von $r_T = 50 \text{ mm}$ gibt, wenn sich die Spule schon sehr nah an der Targetunterseite befindet (Abb. 6-1, rote Kennlinie). Erst wenn man die Spule in das Target selbst verschiebt, stellt sich ein deutlicher Nulldurchgang von B_y ein (Abb. 6-1, ockerfarbene Kennlinie). In der Abb. 6-2 ist innerhalb des Targets eine weitere

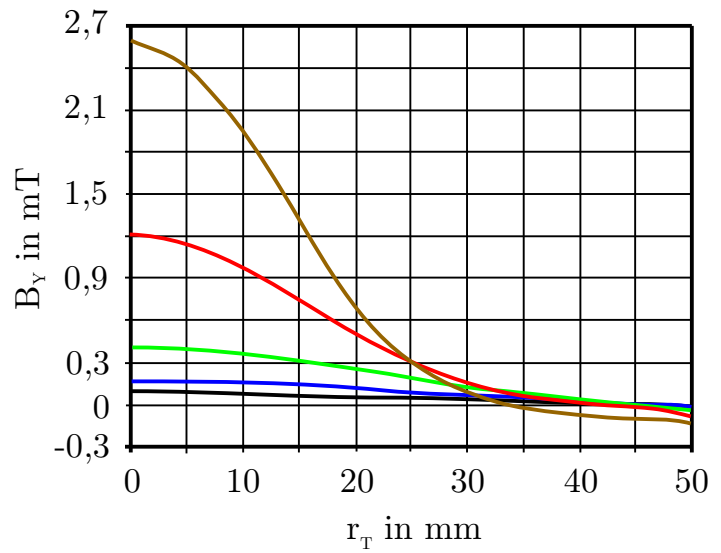
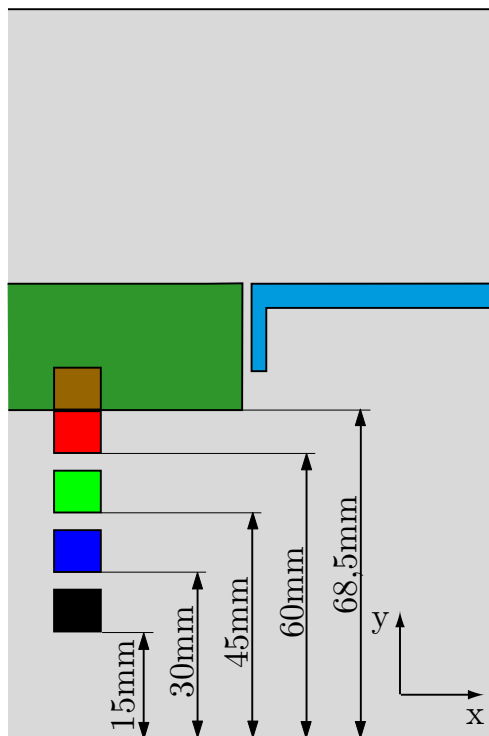


Abb. 6-1 Einfluss des Abstandes der Spule von der Unterseite des Targets

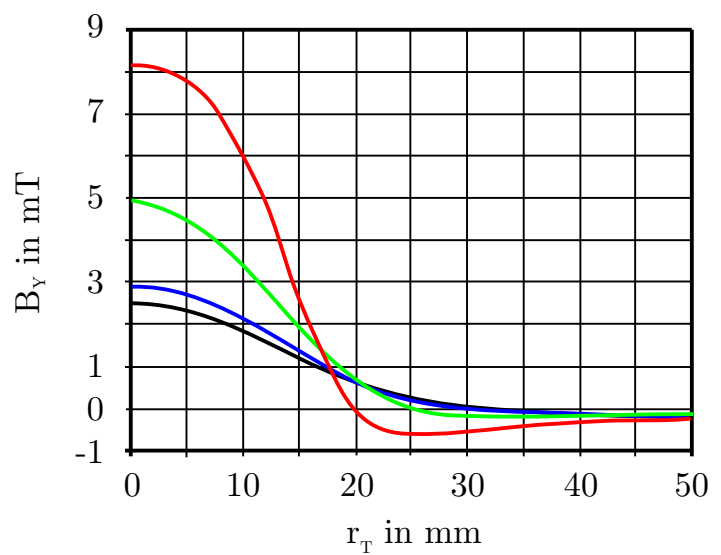
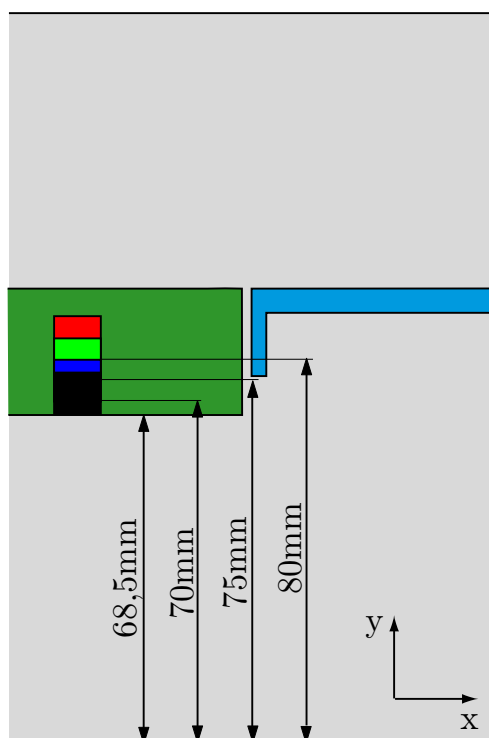


Abb. 6-2 Einfluss des Abstandes der Spule von der Targetoberfläche

Verschiebung in Richtung Oberfläche dargestellt. Wenn man sich der Oberfläche weiter annähert, verschiebt sich r_{Spot} zwar weiter in Richtung Targetmitte, aber die Nutzbarkeit des Targets wird eingeschränkt. Allerdings verschiebt sich r_{Spot} beim Abtragen des Targets auf jeden Fall nach innen, da der Abstand der Spule zur Targetoberfläche hin abnimmt. Unter Berücksichtigung der praktischen Nutzbarkeit des Targets folgte wiederum die Festlegung, dass die Spule, wie auch schon der Permanentmagnet, auf der Targetunterseite zumindest innerhalb des Targets platziert werden sollte.

Der Einfluss der Spule in Bezug auf ihre horizontale Lage wurde als Nächstes simuliert (Abb. 6-3). Je weiter man den Magneten zum Targetrand verschiebt (Vergrößerung des Spulendurchmessers), um so weiter verschiebt sich auch der Nulldurchgang von B_y nach außen. Wenn man die Spule ohne freien Raum in der Mitte wickelt, gibt es keinen eindeutigen Nulldurchgang (Abb. 6-3, schwarze Kennlinie). Da man durch die Schraubbefestigung in der Mitte des Targets aber gezwungen ist einen Bereich freizulassen, wurde für die horizontale Lage der Spule die Position, die der blauen Kennlinie in Abb. 6-3 entspricht, ausgewählt. Diese ergab einen deutlichen Nulldurchgang von B_y .

Damit waren die Abmessungen und die Lage der Spule mit denen des Permanentmagneten gleich und ergaben eine simulierte Bahn der Fußpunkte bei $r_{\text{Spot}} = 33$ mm.

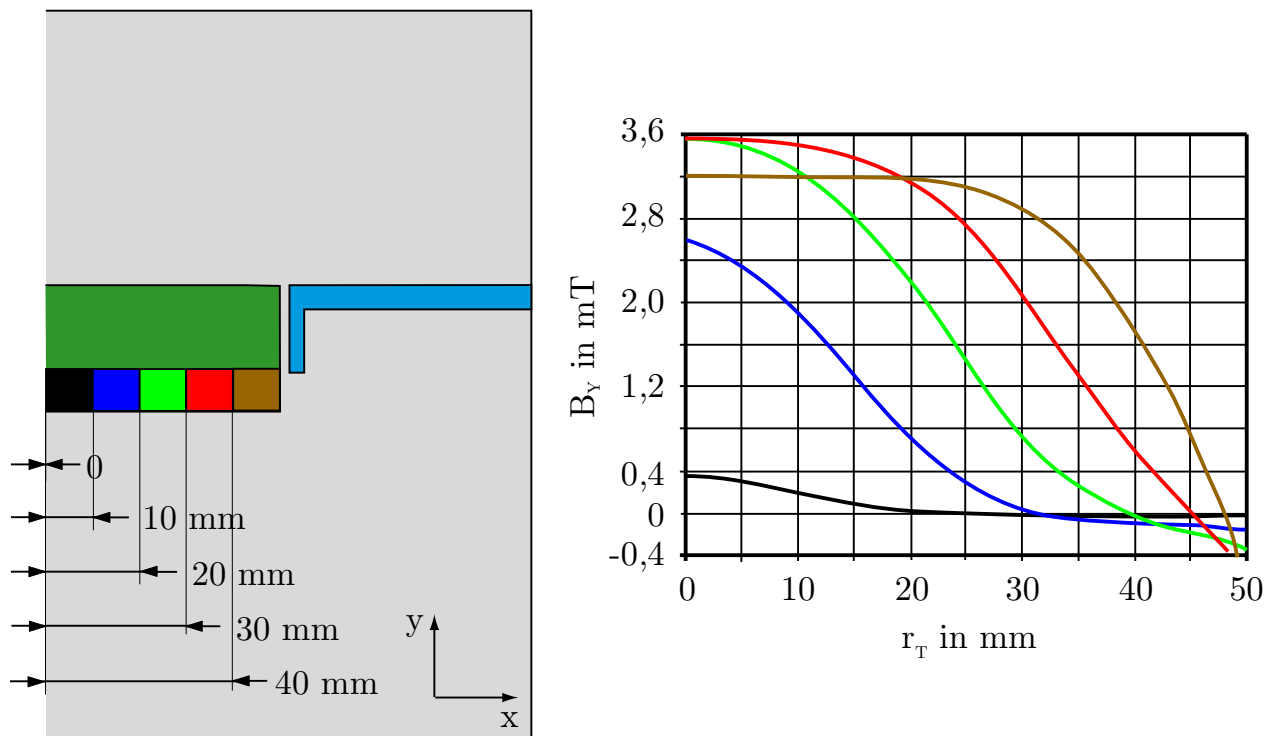


Abb. 6-3 Einfluss der Lage der Spule innerhalb des Targets

Nach der Bestimmung der Form und der Abmessungen der Spule und der Position im Target wurden die Targets an den entsprechenden Stellen ausgefräst. Da dies den Abmessungen für den Permanentmagneten entsprach, trifft die Abb. 5-6 für die Spule ebenfalls zu.

6.2 Realisierung des Spulensystems und einer entsprechenden Versorgung

Die Positionierung der Magnetspule innerhalb des Targets erforderte es, die Zuleitungen für den Spulenstrom im Inneren der Vakuumkammer zu verlegen. Die Leitungen wurden daher mit Hilfe einer Durchführung ins Kammerinnere gebracht. Der verwendete Verdampfer besitzt eine Flüssigkeitskühlung und die runden Targets werden über einen im Mittelpunkt befindlichen Bolzen aufgeschraubt. Eine praktikable Lösung für die Zuleitungen der Spule ist durch die Verwendung eines Adapters gelungen. Dazu wurde eine ca. 3 mm starke Kupferplatte, die den Durchmesser des Targets besitzt, zwischen Verdampfer und Target eingefügt. In deren Inneren wurden Bohrungen für die elektrischen Zuleitungen der Spule eingearbeitet. Dadurch ist eine vollständige elektrische Trennung von Bogenstrom und Spulenstrom möglich. Bei der Materialauswahl zur Spulenherstellung mussten die auftretenden Temperaturen, die durch den Bogenstromfluss im Target und den Spulenstromfluss in der Spule erzeugt wurden, berücksichtigt werden. Für den Spulenkörper kam das Leiterplattenmaterial FP4 (Cevaunit) zum Einsatz. Für die Spulenwicklung wurde seidenumspinnene HF-Litze mit einem Querschnitt von $0,6 \text{ mm}^2$ verwendet. Zusätzlich wurden die Hohlräume in der Spule mit Hochtemperaturkleber aufgefüllt, um die Wicklung zu fixieren. Abb. 6-4 zeigt die entstandene Adapterplatte mit der aufgesetzten Spule und ein Target, bei dem sich die passende Ausfräsung auf der Unterseite befindet.



Abb. 6-4 Adapterplatte mit aufgesetzter Spule und passendes gefrästes Ti-Target

Im Spulenkörper konnten auf diese Weise 38 Windungen untergebracht werden. Die Spule wies dann eine Induktivität von ca. $45 \mu\text{H}$ und einen Widerstand von ca. $140 \text{ m}\Omega$ auf.

Auf der Targetoberfläche wurde unter Verwendung eines konventionellen Labornetzteiles bei $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$ mit dem in Abschnitt 4.2.6 beschriebenen Messgerät „M-Test digital“ der Verlauf der y -Komponente der magnetischen Flussdichte auf der Targetoberfläche gemessen. Der Hall-Sensor wurde dazu in einem festgelegten Messraster parallel zur Targetoberfläche geführt. Der äußere Rand des schraffierten Bereiches in Abb. 6-5 zeigt den Pfad, auf dem die y -Komponente der magnetischen Flussdichte null ist. Dies entspricht etwa dem in der Simulation ermitteltem r_{Spot} von 33 mm (gestrichelte rote Linie in Abb. 6-5). Zimmer et al. gehen für eine hinreichende Beeinflussung der Fußpunktbeugung von magnetischen Flussdichten zwischen $0,5$ und 5 mT aus [089]. Mit dem realisierten Spulensystem wurden maximale magnetischen Flussdichten von ca. $2,5 \text{ mT}$ (y -Komponente) bei $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$ erzeugt.

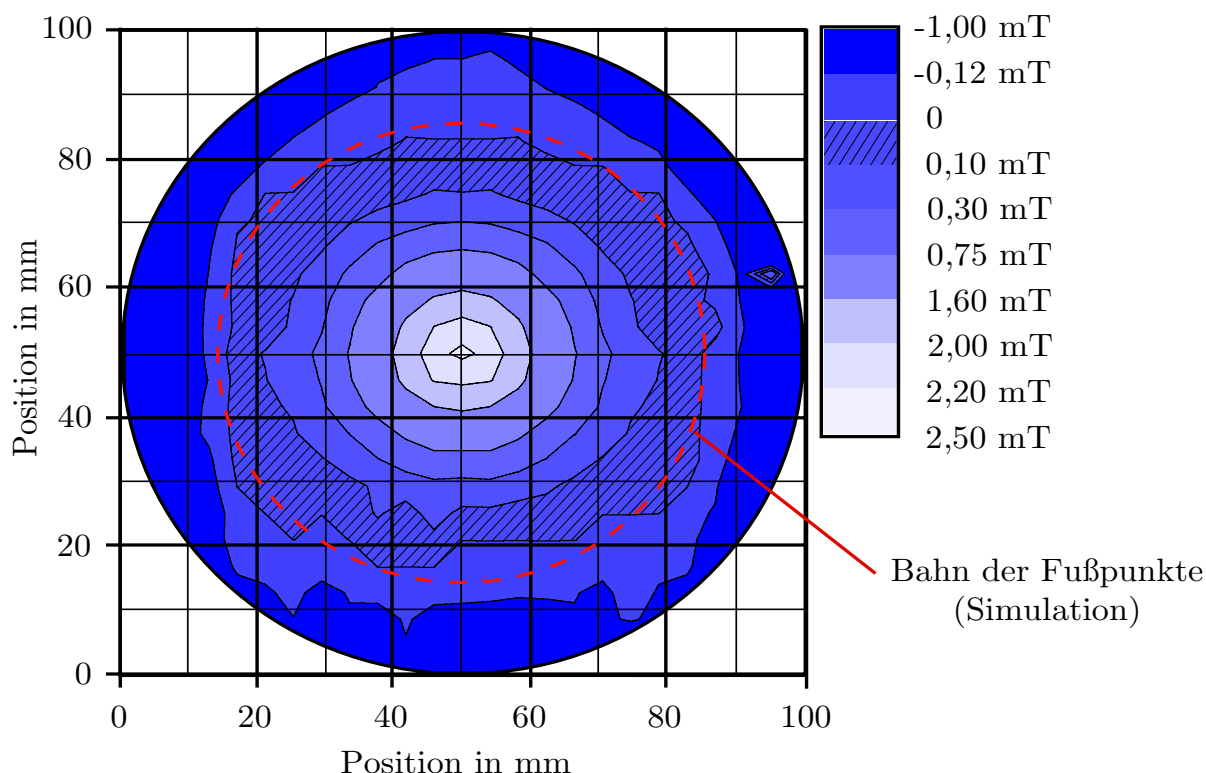


Abb. 6-5 Messung der y -Komponente der magnetischen Flussdichte auf der Targetoberfläche mit dem Messgerät „M-Test digital“ ($I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$)

Für die Magnetstromquelle ergaben sich folgende Anforderungen:

- maximaler Ausgangsstrom der Quelle: 10 A (DC)
- maximale Frequenz bei Pulsbetrieb: 200 Hz (ergab sich aus den zu verwendenden Pulsparametern)
- rechteckförmiger Ausgangsstrom
- Möglichkeit der Synchronisation des Spulenstromes auf den Bogenstrom (der Spulenstrom soll nur in der Grundstromphase des Bogenstromes fließen.)
- freie Stellbarkeit des Ein- bzw. Ausschaltzeitpunktes des Spulenstromes in Bezug auf die Bogenstrompulse

Aus diesen Vorgaben heraus wurde ein Konzept für die Magnetstromversorgung aufgestellt. Da die Anforderungen an die erreichbaren Frequenzen nicht hoch waren, wurde eine konventionelle Stromversorgung auf dem Prinzip eines Längsreglers basierend verwendet. Der vom DC-Leistungsteil gelieferte Gleichstrom sollte dann durch einen Leistungsschalter (IGBT) zu den notwendigen Zeitpunkten ein- und ausgeschaltet werden. Damit ergab sich der geforderte rechteckförmige Verlauf des Spulenstromes. Die Schaltzeitpunkte steuert ein 16-bit-Mikrocontroller von Fujitsu (F²MC 16LX). Die Synchronisation mit dem Bogenstrom wird durch die Messung des Bogenstromes mit einem LEM-Wandler vorgenommen. Eine schematische Übersicht der Komponenten der Magnetstromquelle und ihrer Einordnung in das Gesamtsystem liefert Abb. 6-6.

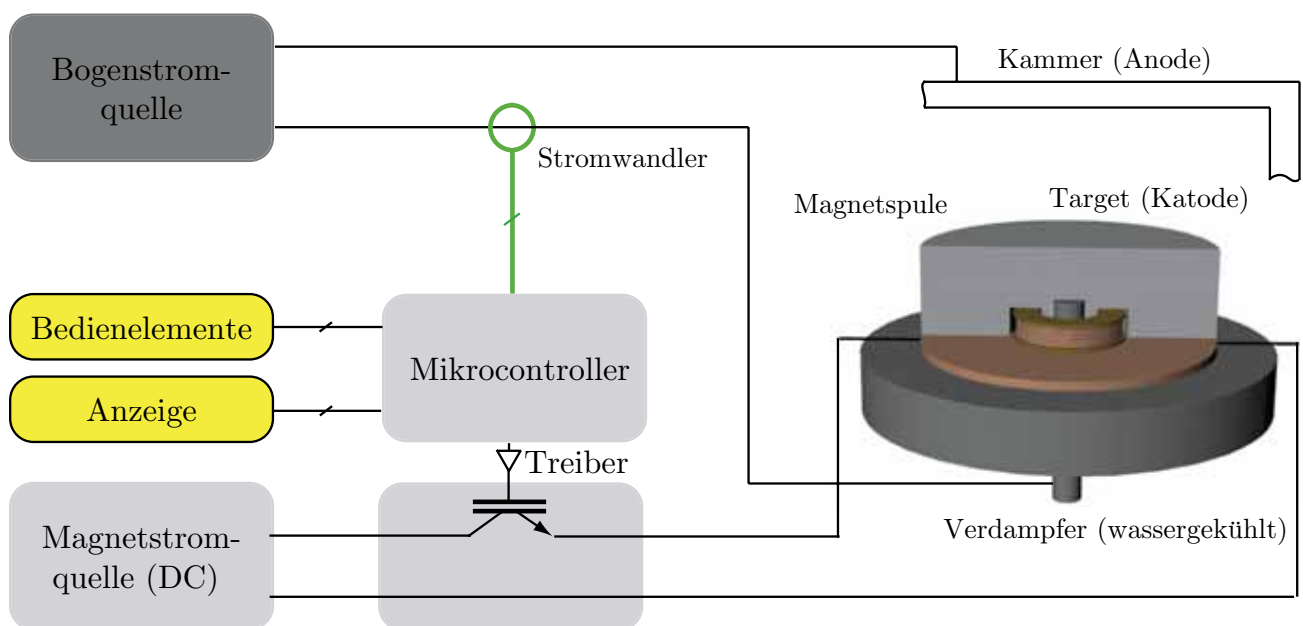


Abb. 6-6 Schematische Übersicht der Komponenten der Magnetstromquelle

Das Konzept der Magnetstromquelle ermöglicht neben den geforderten Vorgaben auch eine Umschaltung zwischen Gleichstrom- und Pulsbetrieb. Dies ist von Vorteil, da auch eine Vergleichsmöglichkeit des Einflusses auf den Beschichtungsprozess zwischen diesen beiden Betriebsarten besteht. Abb. 6-7 zeigt die aufgebaute Magnetstromquelle.



Abb. 6-7 Aufgebaute Magnetstromquelle

Abb. 6-8 verdeutlicht den Verlauf des Spulenstromes beim Pulsbetrieb. Der Spulenstrom soll nur in der Grundstromphase des Bogenstromes fließen. Während der Pulsphase des Bogenstromes ist der Spulenstrom generell null. Die Verwendung des Mikrocontrollers ermöglicht die Einstellung der Schaltzeiten in der Grundstromphase des Bogenstromes.

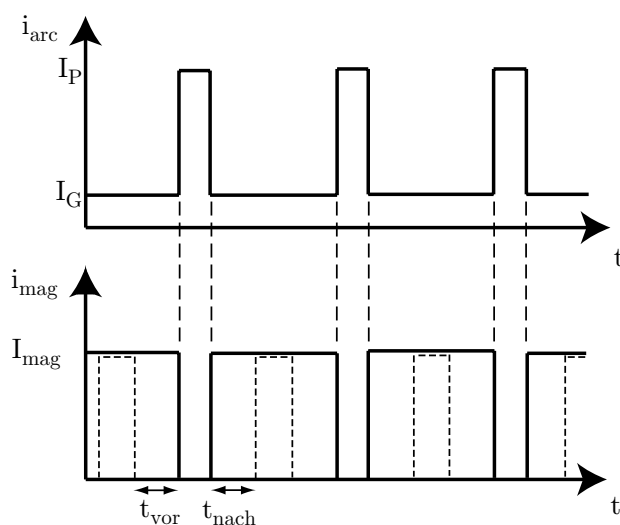


Abb. 6-8 Schematischer Verlauf des synchronisierten Spulenstromes

So kann durch die Festlegung von t_{vor} und t_{nach} die Pulsdauer des Spulenstromes in der Grundstromphase des Bogenstromes eingestellt werden. Die Einstellung von t_{vor} wird durch eine vorangehende Bestimmung der Pulsfrequenz realisiert. Daher muss die Pulsfrequenz des Bogenstromes über die gesamte Dauer des Versuchs konstant bleiben. Bei einer Änderung der Pulsfrequenz und/oder von t_{vor} bzw. t_{nach} muss der Mikrocontroller die neuen Werte einlesen und berechnen. Dazu wird die Abarbeitung des Programms gestoppt, die Werte übernommen und erneut wieder gestartet.

Bei den ersten Versuchen mit der Stromquelle zeigte sich, dass die Spots beim Random-Arc-Prozess und dem Einsatz eines DC-Spulenstroms durch das aufgebaute Magnetfeld wie erwartet eine Kreisbahn auf der Targetoberfläche im simulierten bzw. gemessenen Bereich von $r_{\text{Spot}} \approx 33$ mm ausführten. Die Synchronisation des Spulenstromes auf den Bogenstrom und auch die Möglichkeit der Einstellung der Pulsdauer des Spulenstromes wurde unter Verwendung des modifizierten Puls-Arc-Prozesses nachgewiesen.

6.3 Prozessuntersuchungen mit dem magnetisch gesteuerten modifizierten Puls-Arc-Verfahren

6.3.1 Fußpunktbewegung

Die Untersuchungen der Fußpunktbewegungen wurden mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitskamera realisiert. Dazu sind Aufnahmen mit 4500 Bildern pro Sekunde von der Targetoberfläche erstellt worden. Im Ergebnis dieser Aufnahmen war es möglich, die einzelnen Fußpunkte zu erkennen und ihre Bewegungen zu analysieren. Alle Messergebnisse auf den unterschiedlichen Targetmaterialien sind dem Anhang Tab. A9, Tab. A10 und Tab. A11 zu entnehmen. Durch die begrenzte Aufnahmekapazität des Kamerasystems waren je nach Pulsparametern nur wenige Pulse erfassbar. Bei der Ermittlung der Kreisbahngeschwindigkeiten gab es jeweils einen Messwert, da eine vollständige Umrundung auf der Targetoberfläche innerhalb der Aufnahmezeit stattfand (Abb. 6-9 bis 6-11). Bei den Messungen zu den Pulsen konnten jeweils vier aufgezeichnete Pulse verwendet werden. In den entsprechenden Diagrammen ist daher die Streuung der dargestellten Mittelwertes angegeben (Abb. 6-12 bis 6-17). Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde der Spulenstrom, wie in Abb. 6-8 dargestellt, auf den Bogenstrom synchronisiert. Die aufgetragenen Werte für den Spulenstrom im Diagramm sind die eingestellten Maximalwerte.

So konnte als erstes der Einfluss des durch die Magnetspule fließenden Stromes auf die Geschwindigkeit der Fußpunkte für den Random-Arc und die Grundstromphase des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens bestimmt werden. Abb. 6-9 zeigt einen Vergleich der erreichten Fußpunktgeschwindigkeiten auf der Titan-Oberfläche bei unterschiedlichen elektrischen Parametern (siehe auch Tab. A9-1 und A9-2). Durch das Ansteigen des Spulenstromes I_{mag} in der Spule kommt es zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit der Fußpunkte auf der Kreisbahn. Für verschiedene Pulsdauern t_p wird ein annähernd linearer Zusammenhang erkennbar. Von Martin et al. wurde ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen Spulenstrom und Fußpunktgeschwindigkeit bei einem Steered-Arc-Prozess ermittelt [005]. Walke et al. hingegen beobachteten bei Ansteigen des Spulenstromes eine nichtlineare Steigerung der Fußpunktgeschwindigkeit [090]. Die verwendeten Flussdichten lagen allerdings bei ca. 12 mT (eigene Untersuchungen bei ca. 2,5 mT für $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$).

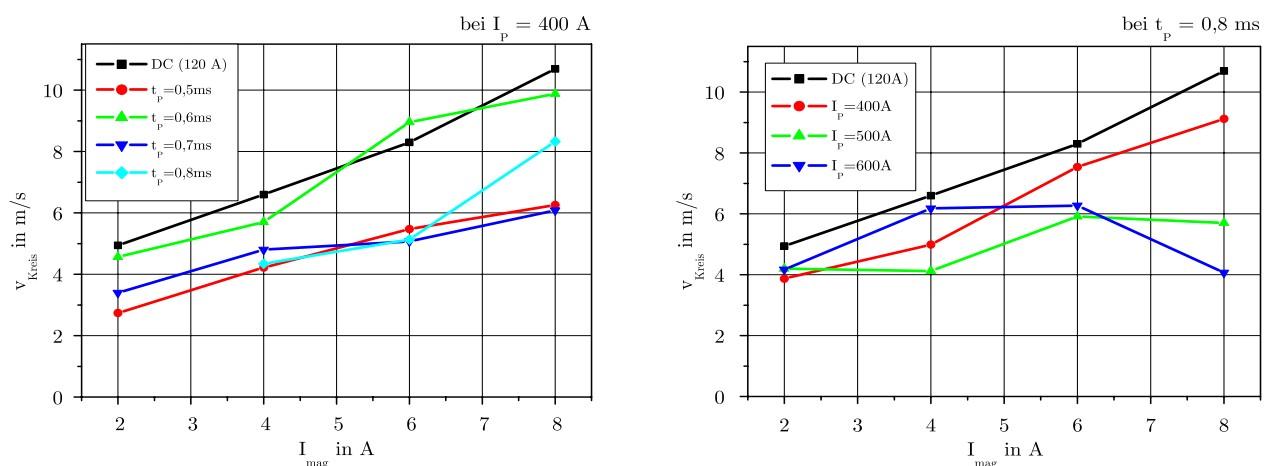


Abb. 6-9 Gemessene Kreisbahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem Ti-Target ($p = 1 \text{ Pa}, N_2$)

Die eingezeichneten Vergleichswerte für einen Steered-Arc (schwarze Kennlinien) zeigen die höchsten Werte für die Geschwindigkeit. Bei den verwendeten Pulsdauern gibt es für $t_p = 0,6 \text{ ms}$ ähnlich hohe Geschwindigkeiten. Dies deutet darauf hin, dass sich im Falle der Magnetfeldbeeinflussung optimale Pulsparameter für eine möglichst hohe Geschwindigkeit der Fußpunkte auf der Targetoberfläche finden lassen. Auch ein Vergleich mit Variation der Pulsstromhöhe I_p zeigt dieses Verhalten. So ist die Einstellung von $I_p = 400 \text{ A}$ für Magnetströme ab 6 A für hohe Fußpunktgeschwindigkeiten günstig, während bei weiterer Erhöhung des Pulsstromes die Geschwindigkeit wieder abnimmt. Die Ursache für diese Verhalten ist in den Pulsen selbst zu sehen.

Sie stellen für die Bewegung der Fußpunkte auf der Kreisbahn eine Störung dar. Nach einem erfolgten Impuls trägt nur einer der Fußpunkte den Grundstrom weiter. Dieser Fußpunkt kann aber auch der Kreisbewegung entgegenwirken, je nachdem an welcher Stelle er sich nach dem Puls befindet. Daher ist auch die Geschwindigkeit der Fußpunkte auf der Kreisbahn ohne Pulsstrom (Steered-Arc) am größten.

Die gemessenen Fußpunktgeschwindigkeiten auf der Chrom-Oberfläche sind kleiner als die auf der Titan-Oberfläche. Wenn man die Abb. 6-10 betrachtet, stellt man fest, dass die Messwerte zwar unregelmäßiger als bei den Messungen auf der Titan-Oberfläche sind, aber ein vergleichbares Verhalten zeigen. Auch hier ist eine Steigerung der Fußpunktgeschwindigkeiten mit der Erhöhung des Spulenstromes zu beobachten und es stellen sich ebenfalls Unterschiede für die verwendeten Pulsparameter ein. So ist z. B. auch hier die Einstellung von $I_p = 400$ A für hohe Geschwindigkeiten günstig.

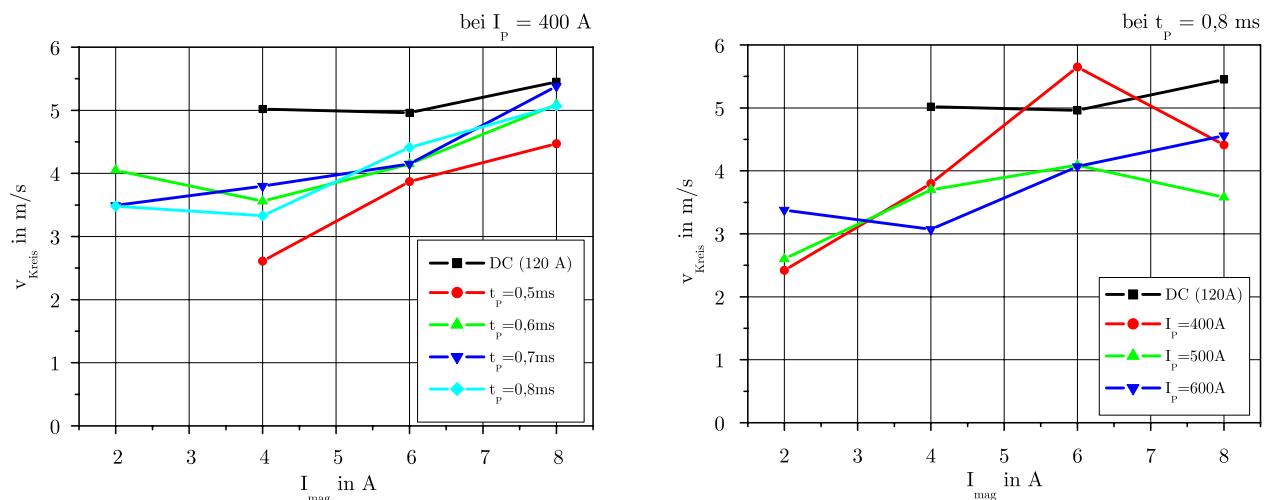


Abb. 6-10 Gemessene Kreisbahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem Cr-Target ($p = 1$ Pa, N_2)

Für die Titan-Aluminium-Oberfläche konnten Fußpunktgeschwindigkeiten ermittelt werden, die im Bereich derer der Titan-Oberfläche liegen. Bei geringen Magnetströmen (unter 4 A) ist die Bewegung der Fußpunkte jedoch sehr unterschiedlich. Es konnte keine Kreisbahn erkannt werden, da die Fußpunkte auf der Oberfläche „springen“. Dieser für die Materialkombination bekannte Effekt erfordert ein stärkeres Magnetfeld für eine zuverlässige Führung auf einer Bahn. Abb. 6-11 zeigt die Abhängigkeit der Fußpunktgeschwindigkeiten vom eingestellten Spulenstrom und den Pulsparametern. Es zeigt sich ein Ansteigen der Fußpunktgeschwindigkeiten mit steigendem Spulenstrom. Das Einhalten der Kreisbahn ist dabei vom Magnetfeld abhängig. Walke et al. berichten

in diesem Zusammenhang von einem sogenannten „drunken walk“ der Fußpunkte bei einem Steered-Arc [091]. Die Fußpunkte bewegen sich dabei von der Kreisbahn, die sich durch den Nulldurchgang der y-Komponente der magnetischen Flussdichte ergibt, nach einer Standard-Verteilung abweichend. Die Abweichung nimmt dabei mit zunehmender y-Komponente der magnetischen Flussdichte ab. Die Bahn stabilisiert sich also.

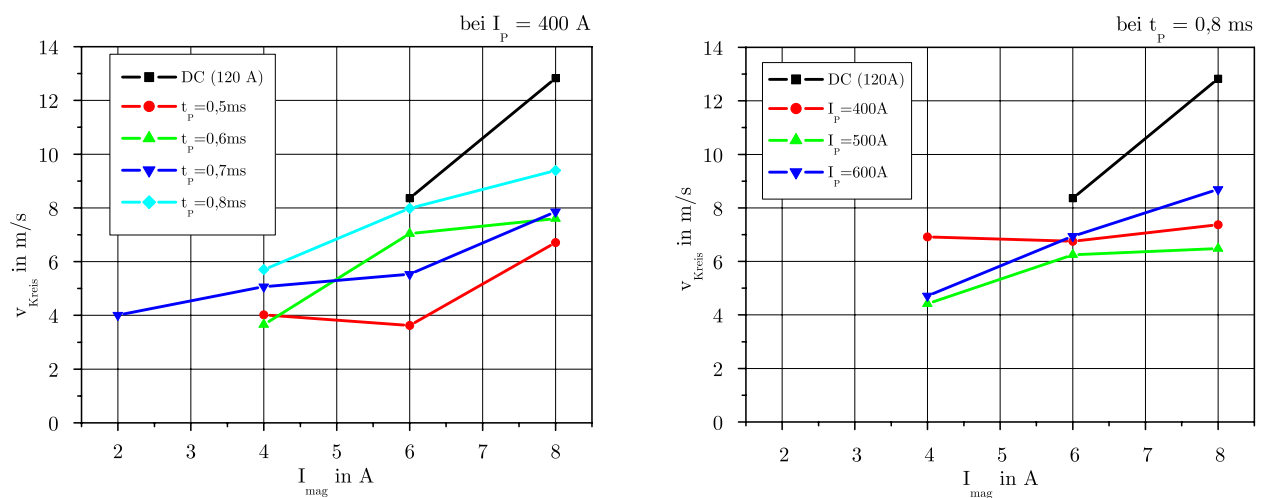


Abb. 6-11 Gemessene Kreisbahngeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem TiAl-Target ($p=1$ Pa, N_2)

Als Nächstes wurden die auftretenden Fußpunktgeschwindigkeiten während der Pulsphase gemessen. Der Einfluss des Spulenstromes auf diese Werte ist aber nur mittelbar zu werten, da während des Pulses der Spulenstrom null wird (siehe Abb. 6-3). Die Messungen haben jedoch gezeigt, dass er möglicherweise einen geringen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Fußpunkte in der Pulsphase hat. Hinzu kommt, dass die Messwerte durchschnittlich aus vier Einzelmessungen ermittelt wurden, da das Videosystem nur eine begrenzte Dauer aufnehmen konnte. Eine höhere statistische Sicherheit würde eine größere Stichprobe erbringen, die aber aus messtechnischen Gründen nicht möglich war. Auch der Abgleich mit einem physikalischen Modell wäre an dieser Stelle wünschenswert.

So ist in Abb. 6-12 zu erkennen, dass es z. B. einen leichten Anstieg der Fußpunktgeschwindigkeiten mit dem Ansteigen des Spulenstromes auf der Titan-Oberfläche gibt. Es ist auch bei den verschiedenen Pulsdauern ein leichtes Ansteigen der Geschwindigkeit mit steigendem Spulenstrom erkennbar. Auch bei der Betrachtung für unterschiedlich hohe Pulsströme in Abb. 6-12 bzw. für die weiteren Targetmaterialien (Abb. 6-13 und 6-14) waren zwar unterschiedliche Geschwindigkeiten messbar, jedoch ist eine

Gesetzmäßigkeit in der Verteilung nicht erkennbar. Wenn man jedoch die Streuung der Messwerte einbezieht, kann keine gesicherte Aussage zur Abhängigkeit von Fußpunktgeschwindigkeiten vom Spulenstrom in der Pulsphase getroffen werden. Vor allem beim Einsatz von Titan-Aluminium-Targets ist die Streuung der Messwerte groß (Abb. 6-14). Die Fußpunkte bewegten sich sehr unregelmäßig auf der Targetoberfläche, wodurch eine große Streuung der Messwerte resultierte.

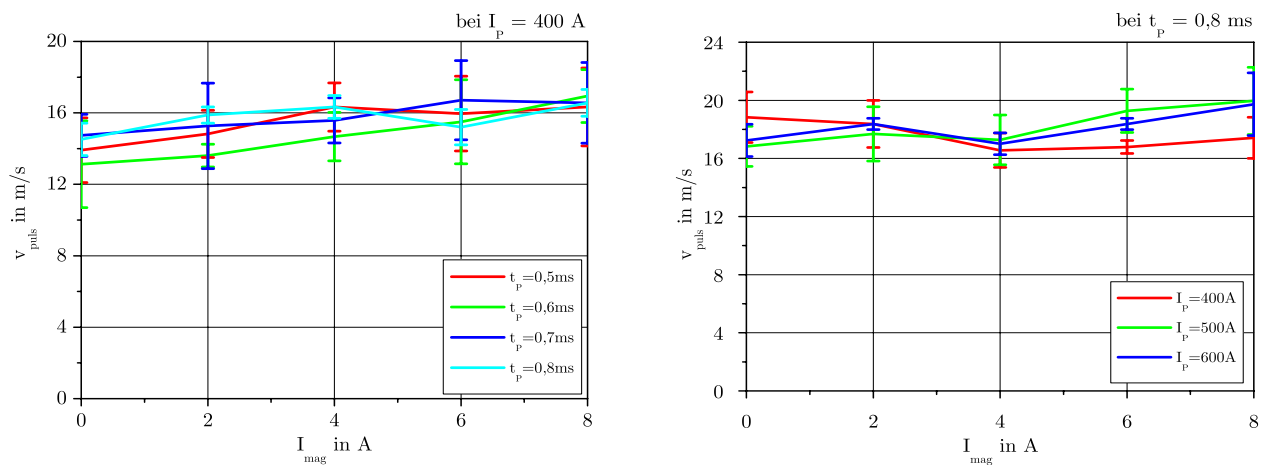


Abb. 6-12 Gemessene Geschwindigkeiten in der Pulsphase in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem Ti-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

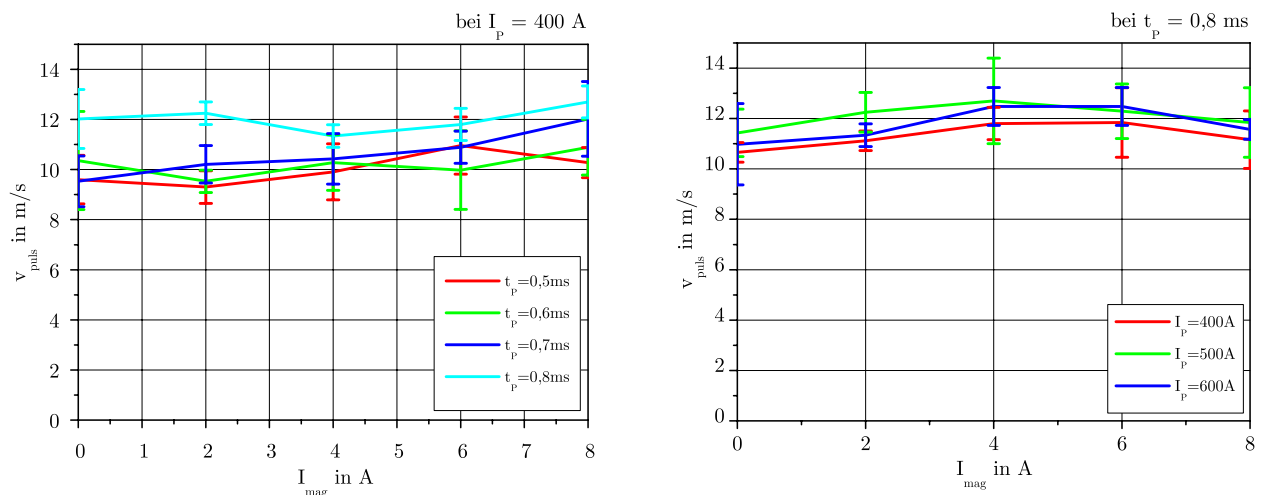


Abb. 6-13 Gemessene Geschwindigkeiten in der Pulsphase in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem Cr-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

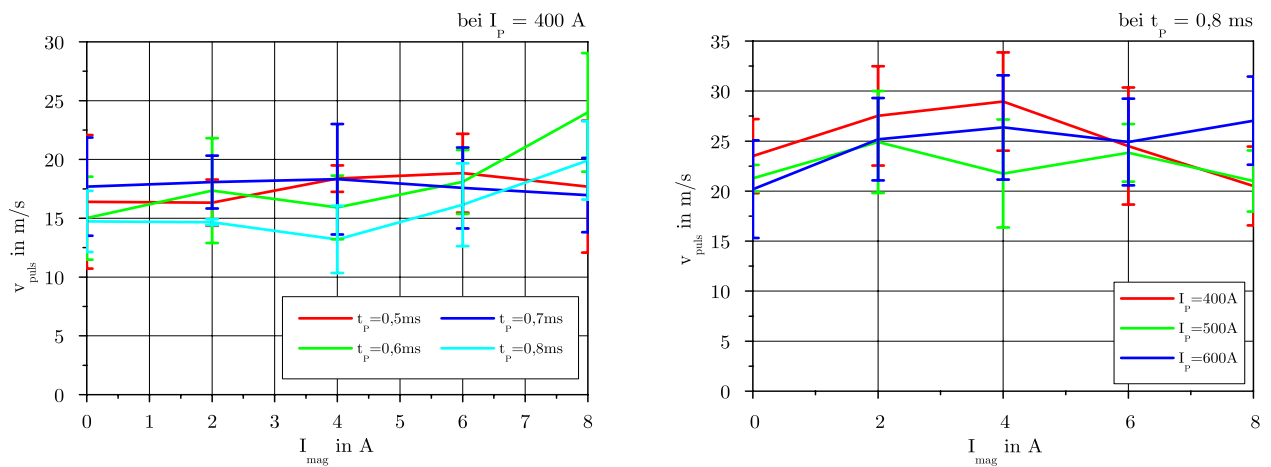


Abb. 6-14 Gemessene Geschwindigkeiten in der Pulsphase in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem TiAl-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Die in den Abb. 6-15 bis 6-17 dargestellten Verläufe sind die maximal erreichten Ausbreitungswege der Fußpunkte auf den Target-Oberflächen. Auch hier ist der Einfluss des Spulenstromes auf diese Werte nur mittelbar zu werten, da während des Pulses der Spulenstrom Null wird. Die gemessenen Werte wurden in der Pulsphase für die auseinanderstrebenden Fußpunkte vermessen. Dabei wurde der jeweils größte zurückgelegte Weg eines ausgewählten Fußpunktes gemessen. Für alle drei Targetmaterialien fällt als erstes der Einfluss der Pulsdauer auf die Ausbreitungswege

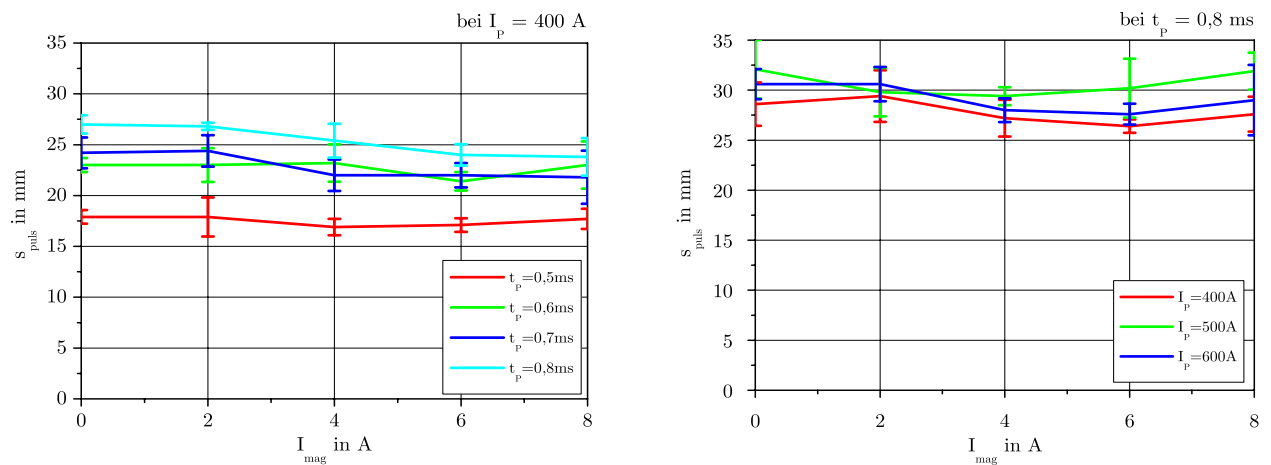


Abb. 6-15 Gemessene Abstände der Fußpunkte am Ende der Pulsphase in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem Ti-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

auf. So wurde mit steigender Pulsdauer ein größerer Ausbreitungsweg zurückgelegt (Abb. 6-15 bis 6-17). Bei der Variation der Pulsstromhöhe lag die eingestellte Pulsdauer jeweils bei $t_p = 0,8$ ms. Durch die hier verwendeten höheren Pulsströme kam es nochmals zu einer Vergrößerung der Ausbreitungswege. Auf der Titan-Aluminium-Oberfläche gab es bei den Messungen die größten Abweichungen der gemessenen Werte, da eine Verfolgung der Fußpunkte durch das „Springen“ auf der Target-Oberfläche erschwert wurde. Auch hier sind die Messungen durch die Streuung der einzelnen Messwerte kritisch zu betrachten.

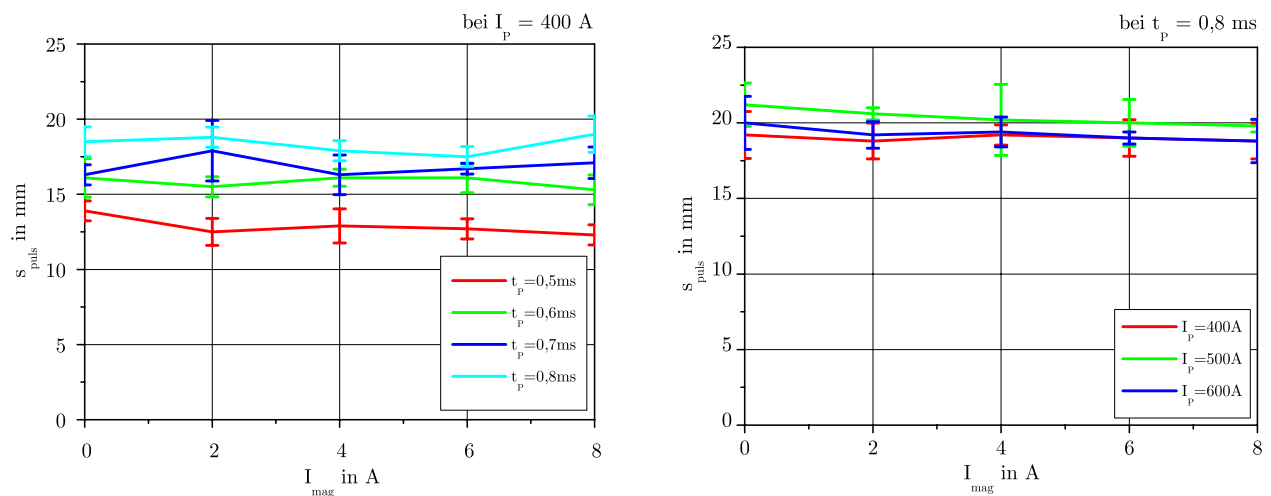


Abb. 6-16 Gemessene Abstände der Fußpunkte am Ende der Pulsphase in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem Cr-Target ($p = 1$ Pa, N_2)

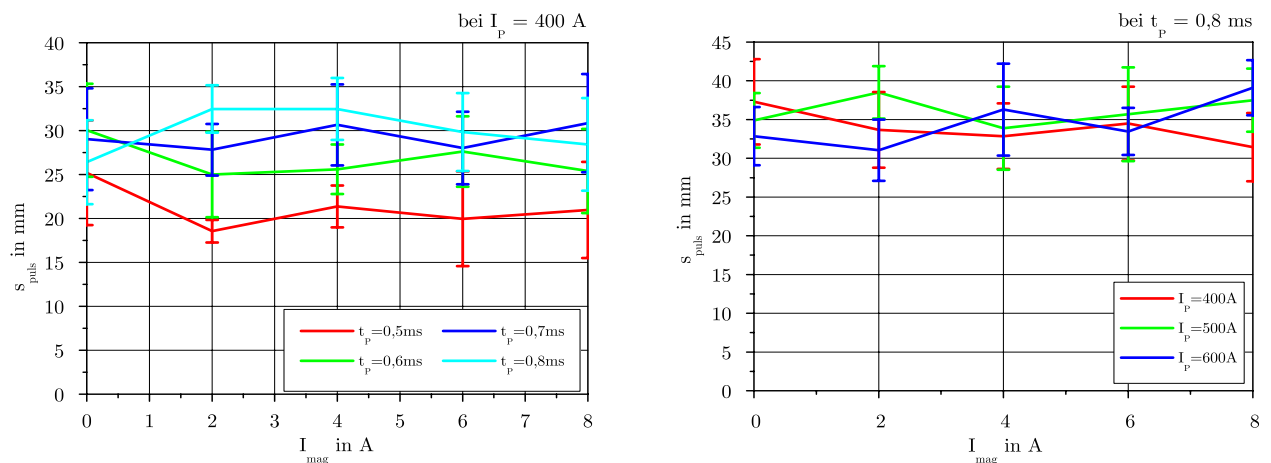


Abb. 6-17 Gemessene Abstände der Fußpunkte am Ende der Pulsphase in Abhängigkeit vom Spulenstrom für verschiedene Pulsparameter auf einem TiAl-Target ($p = 1$ Pa, N_2)

Für die folgenden Untersuchungen wurde die Dauer des Magnetfeldeinflusses durch Variation von t_{vor} und t_{nach} für zwei ausgewählte Pulsparameter betrachtet (siehe Abb. 6-8). Die ermittelten Werte können den Tab. A12 bis Tab. A14 des Anhangs entnommen werden. Bis auf wenige Ausnahmen, die auf ein ungleichmäßiges Bewegungsverhalten der Fußpunkte während der Videoaufnahmen beruhten, nahm die Geschwindigkeit der Fußpunkte bei kleiner werdender Einflussdauer des Magnetfeldes in der Grundstromphase auf der Kreisbahn ab. Dies war bei allen drei verwendeten Targetmaterialien zu beobachten. Eine Abnahme der Spulenstrompulsdauer bewirkte dabei, wie erwartet, eine zunehmende Abweichung von der Kreisbahn. Wenn die Spulenstrompulsdauer weniger als die Hälfte der Grundstromphase abdeckte, zeigten die Fußpunkte überwiegend das Verhalten eines Random-Arcs. Die Verweilzeiten an einzelnen Targetpositionen nahmen zu.

Die Untersuchungen von v_{puls} und s_{puls} für einen nicht während der gesamten Grundstromphase wirkenden Magnetfeldeinfluss haben gezeigt, dass durch die Unterbrechung der Magnetfeldführung der Fußpunkte, die Ergebnisse unter Verwendung gleicher Pulsparameter nicht reproduzierbar waren. Vor allem für das Titan-Aluminium-Target schwankten die ermittelten Werte. Dies lässt den Schluss zu, dass es notwendig ist, die Fußpunkte während der gesamten Grundstromphase durch das Magnetfeld zu führen.

Abschließend kann zur Untersuchung der Fußpunktbewegung Folgendes gesagt werden. In der Grundstromphase sollte für die untersuchte Anordnung der Spulenstrom 8 A betragen, um möglichst hohe Fußpunktgeschwindigkeiten zu erreichen. Bei einem Spulenstrom von 8 A wurden in der Messung mit dem Messgerät „M-Test digital“ Maximalwerte für die y-Komponente der magnetischen Flussdichte von 2,5 mT ermittelt (siehe Abb. 6-5). Das Magnetfeld in der Grundstromphase wirkt einer Dropletbildung entgegen, da ansonsten gerade in der Grundstromphase von Pulsprozessen ein vermehrtes Entstehen von Droplets beobachtet wird. Des weiteren ist die Ausbildung einer definierten Kreisbahn bei eingestellten Magnetströmen unter 6 A nicht sichergestellt. Die Variation der Spulenstrompulsdauer und damit die Unterbrechung der Magnetfeldführung in der Grundstromphase zeigte eine resultierende ungleichmäßige Fußpunktbewegung. Die Kreisbahn wurde mit Abnehmen der Spulenstrompulsdauer während der Grundstromphase nicht mehr eingehalten, was für eine kontrollierte Fußpunktbewegung und damit einem definierten Ausgangspunkt für die Bogenstrompulse ungünstig ist.

6.3.2 Ionenstrom und Ionenstromverteilung

Die Messung des Ionenstromes erfolgte mit den im Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Sonden. Die elektrischen Verläufe wurden über einen Zeitraum von mindestens einer Sekunde aufgezeichnet, um den Einfluss von prozessbedingten Abweichungen und Störungen zu verringern. Die erhaltenen Verläufe wurden nach Mittelwerten und Maximalwerten des Ionenstromes im Bezug zu den entsprechenden Bogenstromgrößen ausgewertet. Die einzelnen Sonden befanden sich bei den Messungen jeweils 140 mm vom Zentrum des Targets entfernt. Die Messergebnisse sind im Anhang Tab. A15 bis A21 zusammengestellt.

Ein Nachweis der Funktion der Magnetspule ist durch den Vergleich der Abb. 6-18 und 6-19 gegeben. Wenn kein Strom durch die Magnetspule fließt, führt die stochastische Bewegung der Fußpunkte in Bezug auf die fest stehenden Ionenstromsonden zu den in Abb. 6-18 gezeigten Ionenstromverläufen. Bei einem Spulenstrom von 8 A (Abb. 6-19) ist zu erkennen, dass an den Sonden $22,5^\circ$ und 45° sich eine Erhöhung der Frequenz ergibt. Da die Höhe des Ionenstromes vom Abstand zu den Sonden abhängig ist, lässt sich daher die Umlauffrequenz aus diesen Verläufen ablesen. An der Sonde 0° wird der Ionenstromverlauf durch den fließenden Spulenstrom gleichmäßiger. Dies ergibt sich durch die Kreisbahn der Fußpunkte und den daraus resultierenden gleichmäßigen Abstand zur Sonde 0° .

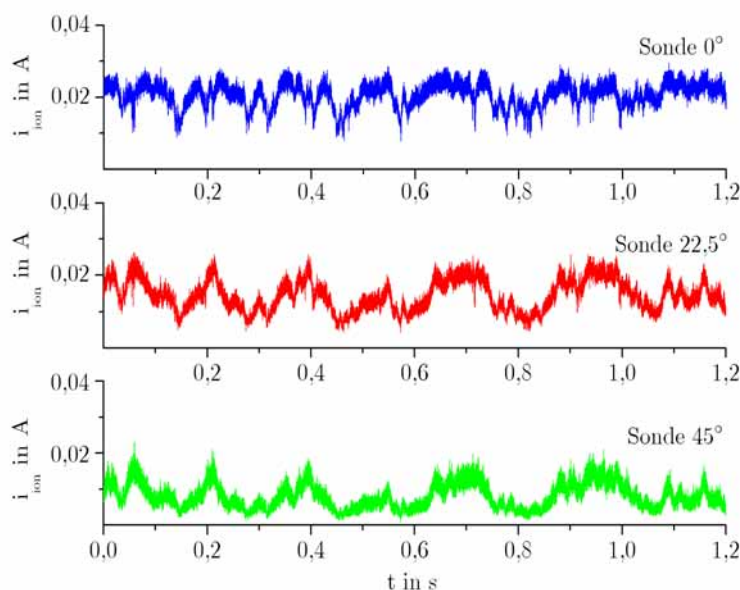


Abb. 6-18 Beispiel eines Ionenstrom-Verlaufes beim Random-Arc-Prozess

($I_{\text{mag}} = 0$; Ti -Target; $I_{\text{DC}} = 80$ A; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100$ V; $p = 1$ Pa, N_2)

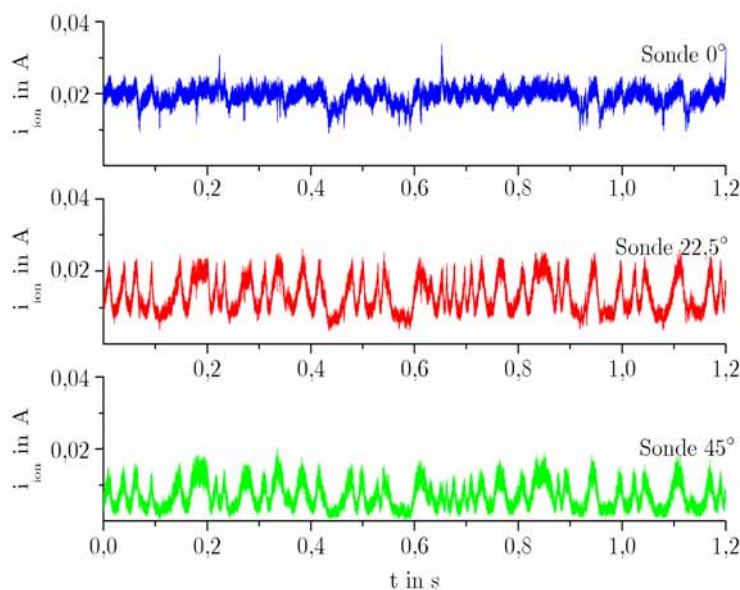


Abb. 6-19 Beispiel eines Ionenstrom-Verlaufes beim Steered-Arc-Prozess
 ($I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$; Ti-Target; $I_{\text{DC}} = 80 \text{ A}$; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Im Anhang Abb. A4 ist beispielhaft eine Zusammenstellung der zur Ionenstrombewertung aufgenommenen elektrischen Größen dargestellt. Neben dem Lichtbogenspannungs- und dem Lichtbogenstromverlauf sind der durch die Magnetspule fließende Spulenstrom und die Werte aus den gemessenen Stromverläufe an den drei Ionenstromsonden zu sehen. Der Magnetstrom ist dabei auf den Bogenstrom synchronisiert, das heißt, während der Grundstromphase fließt ein Bogenstrom und ein Magnetfeld wird erzeugt. In der Pulsphase ist kein Magnetstrom vorhanden.

Abb. 6-20 zeigt einen Vergleich dieser Werte für einen Random-Arc und das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom fließenden Spulenstrom unter Verwendung eines Ti-Targets. Dabei konnten folgende Zusammenhänge beobachtet werden. Mit steigendem Spulenstrom, also einem Ansteigen der Magnetflussdichte, ist eine Abnahme des Mittelwertes des Ionenstromes an den Sonden 0° und $22,5^\circ$ zu beobachten. Dieses Verhalten ist bei Verwendung des gepulsten Prozesses ausgeprägter. An der Sonde 45° wird kaum ein Einfluss sichtbar. Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Verwendung von Chrom bzw. Titan-Aluminium als Targetmaterial (Abb. 6-21 und 6-22).

Desweiteren ist zu bemerken, dass unabhängig vom fließenden Spulenstrom an den Sonden 0° und $22,5^\circ$ eine Erhöhung des Mittelwertes des Ionenstromes für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren im Vergleich zum Random-Arc auftritt, während es an der Sonde 45° umgekehrt der Fall ist. Dies deutet auf eine Fokussierung des Plasmas durch den gepulsten Prozess hin [014].

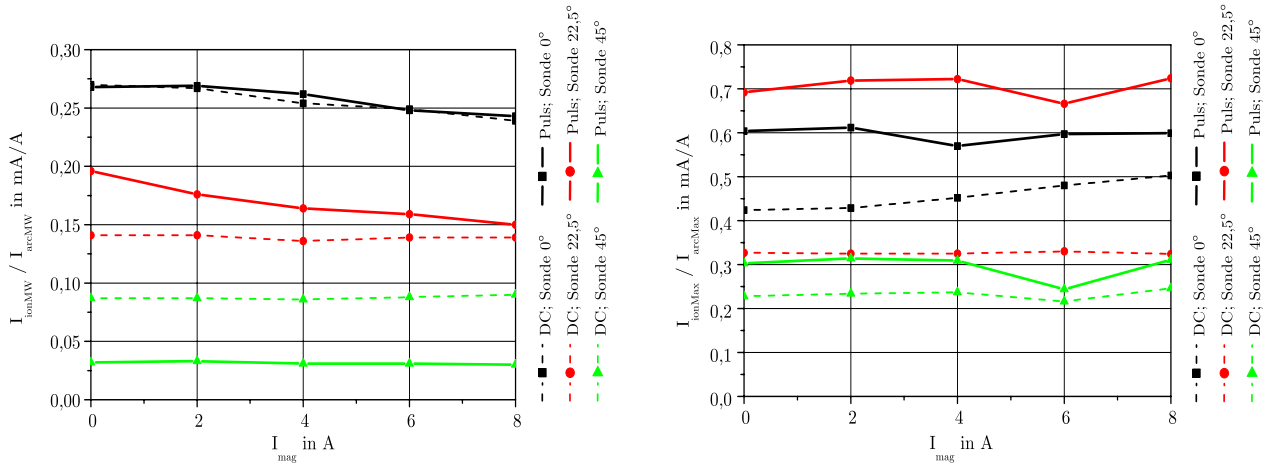


Abb. 6-20 Mittelwert und Maximalwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für einen DC- und einen Pulsprozess bei gleichem Mittelwert des Bogenstromes ($I_{arcMW} = 120 A$) in Abhängigkeit vom Spulenstrom unter Verwendung eines Ti-Targets

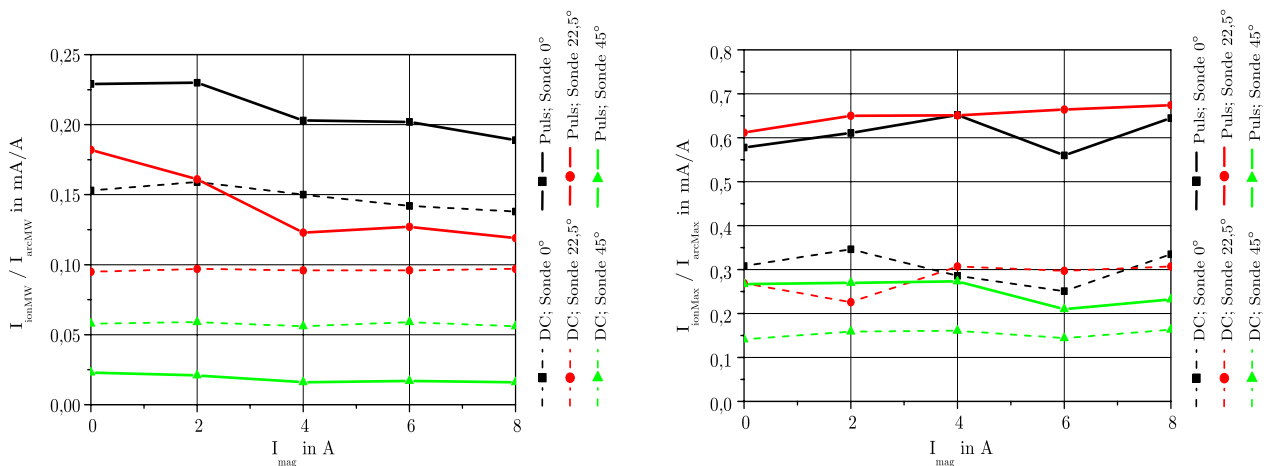


Abb. 6-21 Mittelwert und Maximalwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für einen DC- und einen Pulsprozess bei gleichem Mittelwert des Bogenstromes ($I_{arcMW} = 120 A$) in Abhängigkeit vom Spulenstrom unter Verwendung eines Cr-Targets

Für Chrom bzw. Titan-Aluminium als Targetmaterial nimmt der Mittelwert des Ionenstromes an den Sonden 0° und 22,5° für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren im Vergleich zum Random-Arc stärker ab als bei der Verwendung von Titan. Bei einer Betrachtung der Maximalwerte des Ionenstromes fällt eine veränderte Verteilung an den Sonden für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren im Vergleich zum

Random-Arc auf. Während beim Random-Arc die Maximalwerte des Ionenstromes von Sonde 0° in Richtung Sonde 45° abnehmen, gibt es für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren an der Sonde $22,5^\circ$ die höchsten Werte. Dies gilt gleichermaßen für alle verwendeten Targetmaterialien. Der Einfluss der Höhe des Spulenstromes auf die Maximalwerte des Ionenstromes fällt sehr unterschiedlich aus und ist nicht eindeutig zu beschreiben. Vor allem bei Verwendung des TiAl-Targets schwankten die ermittelten Werte stark (Abb. 6-22). Das unregelmäßige Bewegungsverhalten der Fußpunkte, wie schon angesprochen, spiegelte sich auch in der Verteilung der Maximalwerte des Ionenstromes wider. Die unregelmäßige Bewegung der Fußpunkte auf der Targetoberfläche, die den Ausgangspunkt des Ionenstromes bestimmen, führte zu einer ungleichmäßigen Verteilung der Maximalwerte des Ionenstromes.

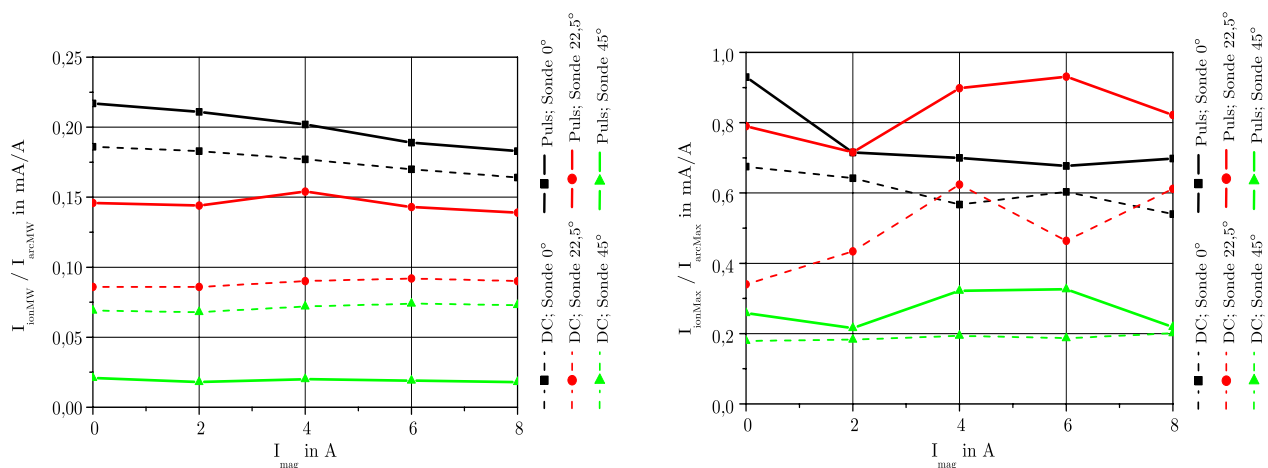


Abb. 6-22 Mittelwert und Maximalwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für einen DC- und einen Pulsprozess bei gleichem Mittelwert des Bogenstromes ($I_{arcMW} = 120 \text{ A}$) in Abhängigkeit vom Spulenstrom unter Verwendung eines TiAl-Targets

Für die Untersuchung der Auswirkungen unterschiedlicher Pulsparameter und Magnetfelder auf den Ionenstrom wurde z. B. die Pulsdauer variiert und ohne Magnetfeldeinfluss bzw. bei Einfluss eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes betrachtet. Die Abb. 6-23 bis 6-25 zeigen die Verläufe für unterschiedlichen Targetmaterialien. Die Mittelwerte des Ionenstromes liegen an den Sonden 0° und $22,5^\circ$ und für die verwendeten drei Targetmaterialien beim Vorhandensein eines Magnetfeldes unter den Werten, die ohne Magnetfeldeinfluss gemessen wurden. An der Sonde 45° gab es für die Mittelwerte des Ionenstromes nur geringe Unterschiede.

Eine Erhöhung der Impulsdauer führte an der Sonde 0° zu einem Anstieg des Mittelwertes des Ionenstromes. Für das Ti-Target (Abb. 6-23) wurde z. B. bei Erhöhung der Pulsdauer von 0,5 auf 0,8 ms ein Anstieg um ca. 6 % im gepulsten Prozess ohne Magnetfeldeinfluss und um ca. 14 % im gepulsten Prozess mit Magnetfeldeinfluss ermittelt. Bei Verwendung von Chrom- und Titan-Aluminium-Targets gab es eine Steigerung von jeweils ca. 3 % im gepulsten Prozess ohne Magnetfeldeinfluss. Unter Magnetfeldein-

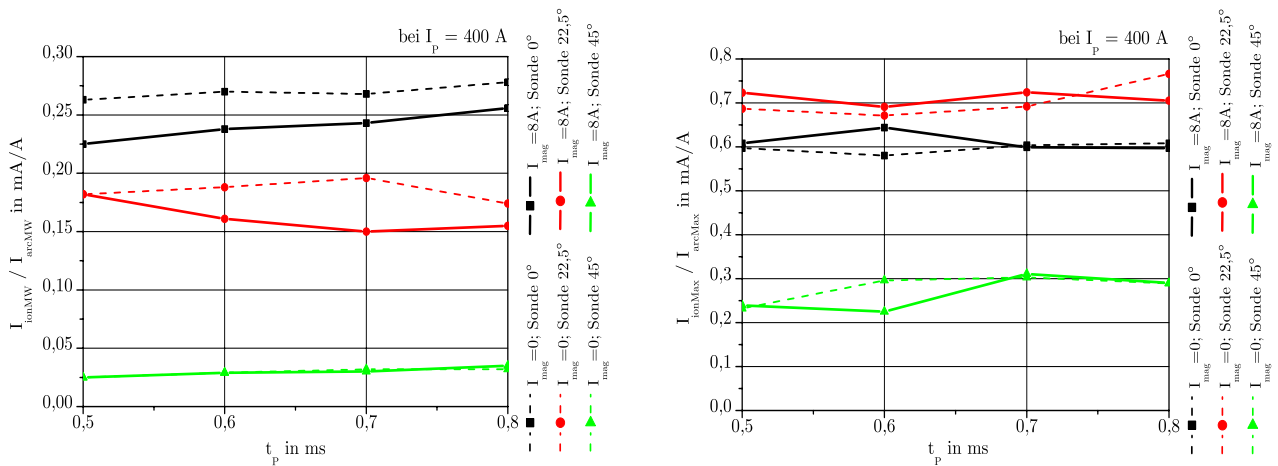


Abb. 6-23 Mittelwert und Maximalwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit von der Pulsdauer bei einem Spulenstrom von Null und synchronisierten 8 A im Vergleich bei Verwendung eines Ti-Targets

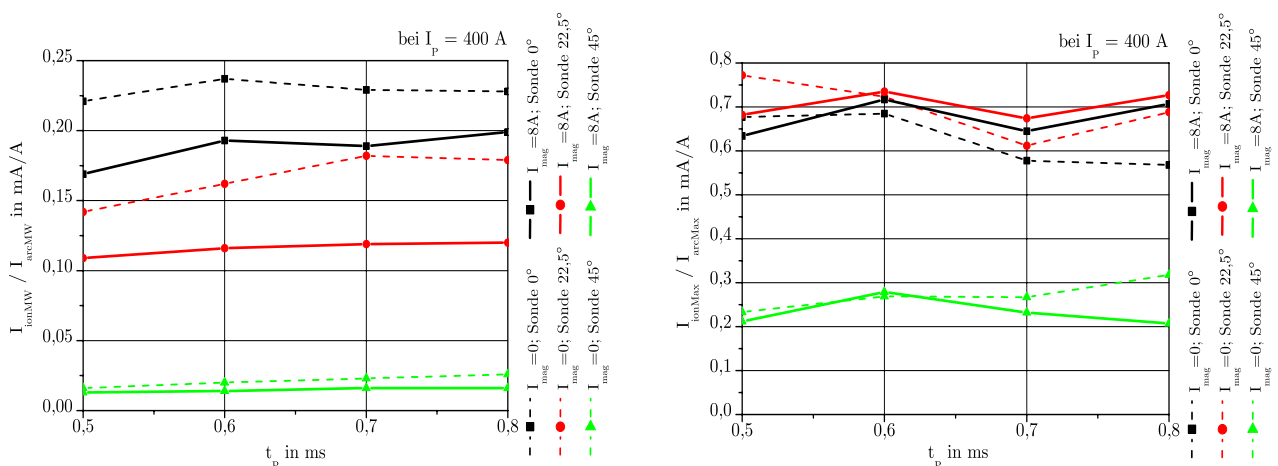


Abb. 6-24 Mittelwert und Maximalwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit von der Pulsdauer bei einem Spulenstrom von Null und synchronisierten 8 A im Vergleich bei Verwendung eines Cr-Targets

fluss konnte für ein Chrom-Target eine Steigerung von ca. 18% beobachtet werden (Abb. 6-24). Die Verwendung eines Titan-Aluminium-Targets zeigte bei Variation der Pulsdauer an allen Sonden kaum eine Veränderung des Mittelwertes des Ionenstromes. Für die Maximalwerte des Ionenstromes wurden unter Verwendung eines Titan-Targets an der Sonde 22,5° die größten Werte ermittelt. Das Vorhandensein eines Magnetfeldes hatte nur einen geringen Einfluss auf die Maximalwerte. Die Kurven in Abb. 6-23 (rechts) unterscheiden sich dementsprechend nur geringfügig. Auch für Chrom (Abb. 6-24, rechts) trifft das gleiche Verhalten zu. Lediglich für das Titan-Aluminium-Target (Abb. 6-25) zeigen sich Unterschiede in den Maximalwerten des Ionenstromes. Das Vorhandensein eines Magnetfeldes führt hier teilweise zu kleineren Werten (Sonde 0°).

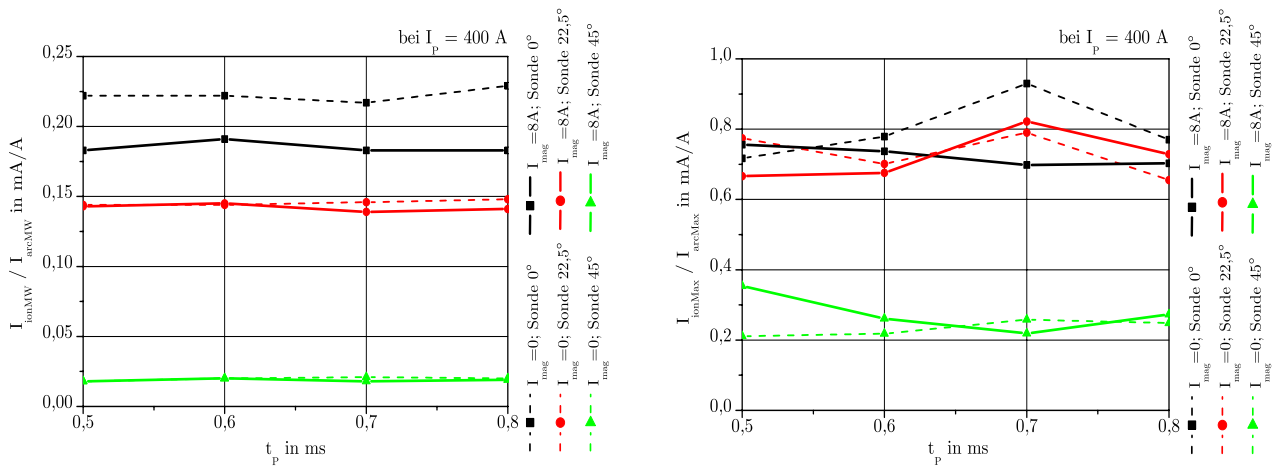


Abb. 6-25 Mittelwert und Maximalwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit von der Pulsdauer bei einem Spulenstrom von Null und synchronisierten 8 A im Vergleich bei Verwendung eines TiAl-Targets

Bei der Variation der Spulenstrompulsdauer (t_{vor} , t_{nach} verändert) steigt der gemessene Mittelwert des Ionenstromes mit der Verringerung der Pulsdauer an (siehe Tab. A21, Sonde 0°). Im Hinblick auf das ungleichmäßige Bewegungsverhalten der Fußpunkte, wenn nicht während der gesamten Grundstromphase des Bogenstromes ein Magnetfeld wirkte, wurde diese Variationmöglichkeit verworfen und für die nachfolgenden Beschichtungsversuche während der gesamten Grundstromphase der Spulenstrom eingeschaltet.

Die Ionenstrommessungen lassen, wie erwartet, darauf schließen, dass ein vorhandenes Magnetfeld eine Verringerung des Mittelwertes des Ionenstromes hervorruft. Es

ist aber ebenfalls erkennbar, dass dieser Tendenz je nach verwendetem Targetmaterial durch Verwendung eines gepulsten Prozesses mit synchronisiertem Spulenstrom entgegengewirkt werden kann. Eine nur teilweise Magnetfeldeinwirkung während der Grundstromphase des Bogenstromes wurde untersucht, aber nicht weiter verwendet, da das Bewegungsverhalten, insbesondere die Einhaltung der Kreisbahn, dadurch nicht gewährleistet werden konnte.

6.3.3 Beschichtungsrate und Schichtdickenverteilung

Die Tabellen A22 bis A24 des Anhangs beinhalten die ermittelten Beschichtungsraten und Massenerosionskoeffizienten für die untersuchten Targetmaterialien. Der Abstand des Substrats vom Target während der Beschichtungen betrug jeweils 220 mm. Die ausgewählten Pulsparameter und die zum Vergleich herangezogenen Messungen bei Random-Arc wurden jeweils ohne Magnetfeld mit auf den Bogenstrom synchronisierten gepulstem Magnetfeld und einem durchgängig auch während der Pulsphase wirkenden Magnetfeldes untersucht und ausgewertet. Der Massenerosionskoeffizient wurde durch Bestimmung der Massedifferenz des Targets vor und nach jedem Versuch ermittelt. Für die Berechnung der Beschichtungsraten und die Darstellung der Schichtdickenverteilungen wurden die Schichtdicken auf dem Substrat durch den in Abschnitt 4.2.5 beschriebenen Kalottenschliff gemessen.

Die Untersuchungen bestätigten eine bekannte Eigenschaft des modifizierten Puls-Arc-Prozesses die Erhöhung der Beschichtungsrate im Vergleich zu einem Random-Arc-Prozess [038]. Der Einfluss eines Magnetfeldes führte bei beiden Prozessen zu einer Verringerung der Beschichtungsrate, die ein Merkmal des Steered-Arc-Prozesses ist. Dieses Verhalten konnte bei der magnetischen Beeinflussung des modifizierten Puls-Arc-Prozesses ebenfalls beobachtet werden.

Die Beschichtungsraten zeigten, dass die Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes einen Anstieg der Raten im Vergleich zu einem durchgängigen, auch während der Pulsphase des Prozesses bestehenden Magnetfeld, bewirkte. Dies war sowohl für die Verwendung eines Titan-Targets (Abb. 6-26) als auch für das Chrom-Target (Abb. 6-27; eine Ausnahme bei 0,5 ms durch mögliche Abweichungen im Prozessablauf) feststellbar. Je nach Wahl der Pulsparameter wurden Erhöhungen der Beschichtungsraten für Titan von bis zu 7 % und für Chrom von bis zu 21 % bei Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes im Vergleich zu einer durchgängigen Magnetfeldbeeinflussung erzielt.

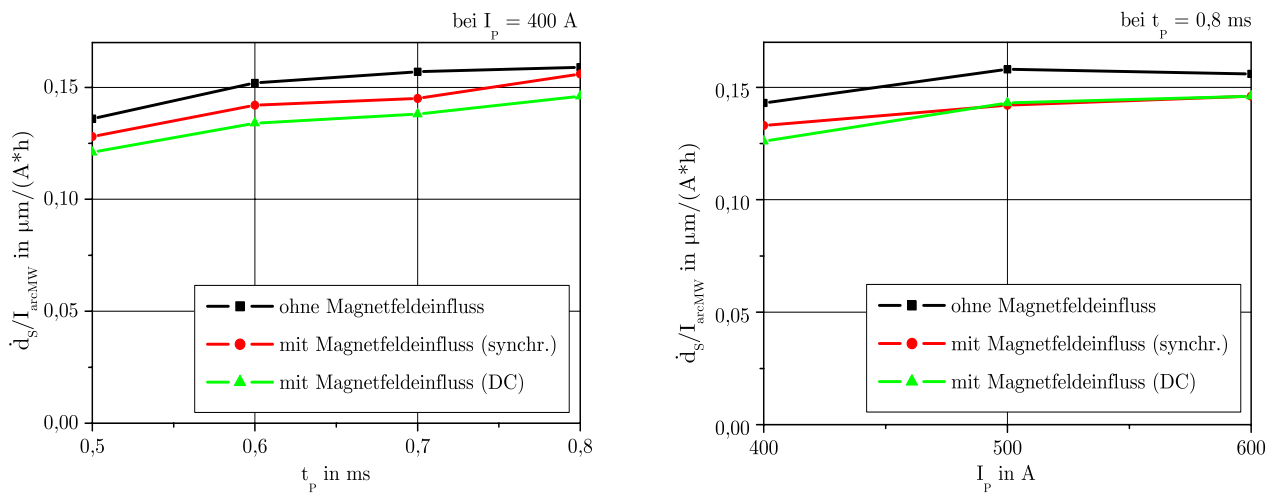


Abb. 6-26 Abhängigkeit der Beschichtungsrate von verschiedenen Pulsparametern beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Titan-Targets
($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$; Abstand Target-Substrat: 220 mm)

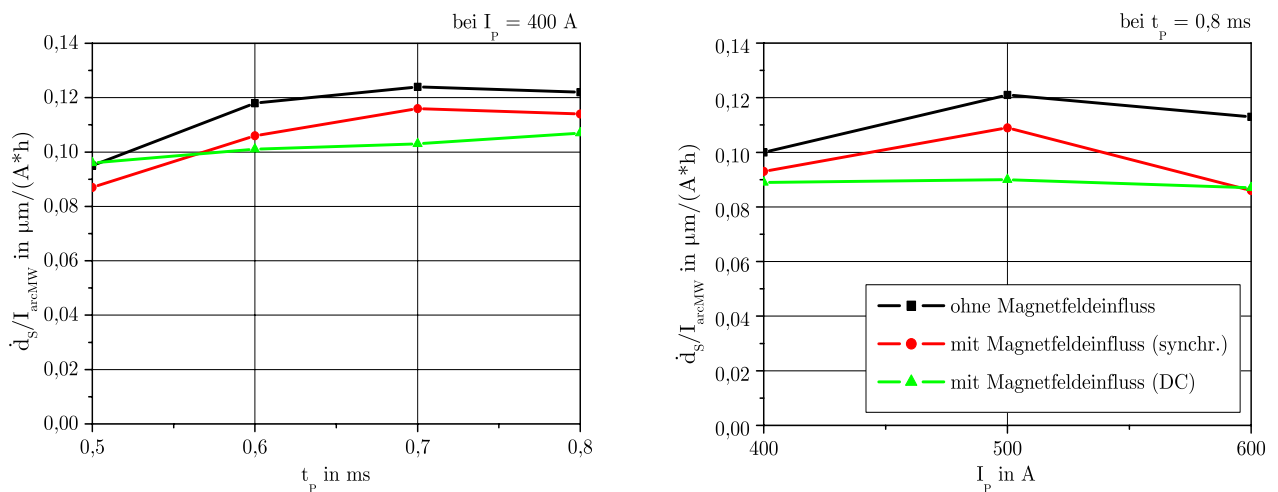


Abb. 6-27 Abhängigkeit der Beschichtungsrate von verschiedenen Pulsparametern beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Chrom-Targets
($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$; Abstand Target-Substrat: 220 mm)

Für Titan-Aluminium-Targets konnte eine Erhöhung der Beschichtungsrate bei Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes im Vergleich zu einer durchgängigen Magnetfeld nicht bestätigt werden. Bei diesem Targetmaterial lagen die Beschichtungsraten je nach verwendeten Pulsparametern für den synchronisierten Magnetfeldeinfluss bis zu 7 % unterhalb der Werte des Prozesses, bei

dem das durchgängig wirkende Magnetfeld zum Einsatz kam (Abb. 6-28). Lediglich bei $t_p = 0,7$ ms lag die Beschichtungsrate ca. 5 % darüber.

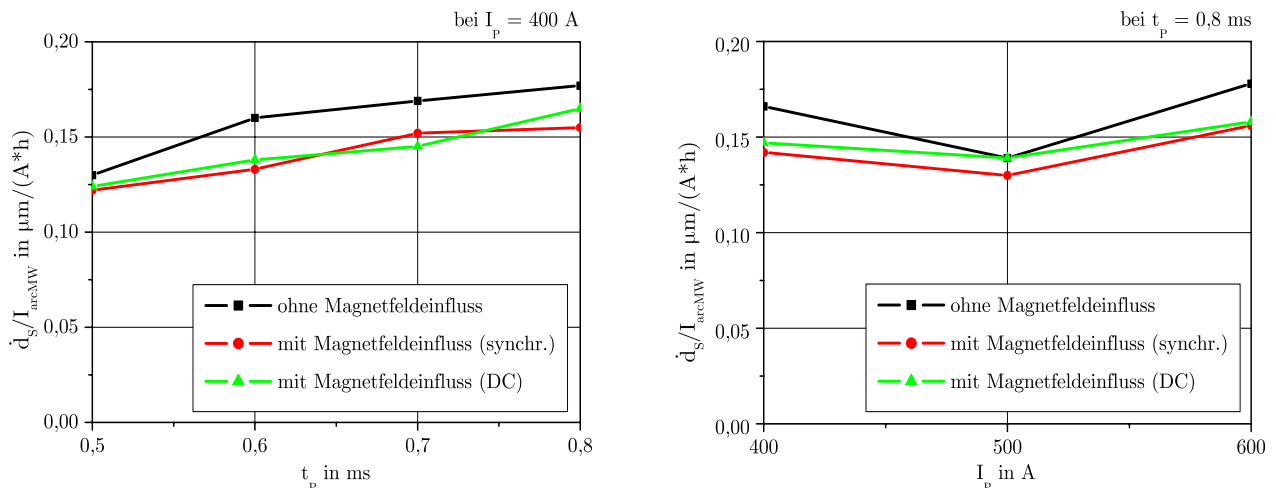


Abb. 6-28 *Abhängigkeit der Beschichtungsrate von verschiedenen Pulsparametern beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Titan-Aluminium-Targets*
($p = 1$ Pa; $I_{\text{mag}} = 0$ A / 8 A; Abstand Target-Substrat: 220 mm)

Die Pulsparameter beeinflussten die Beschichtungsraten jedoch in jedem Fall unabhängig davon, ob ein Magnetfeldeinfluss bestand oder nicht. So war mit der Steigerung der Pulsdauer ein Ansteigen der Beschichtungsraten zu verzeichnen. Das Erhöhen der Pulsdauer bei ansonsten gleichen Parametern ergab eine Erhöhung des Mittelwertes des Bogenstromes und damit einen Anstieg der gemessenen Beschichtungsrate. Bei anderen Untersuchungen, die den modifizierten Puls-Arc-Prozess betreffen, wurde ebenfalls eine Abhängigkeit der Beschichtungsraten von der Pulsdauer festgestellt [049]. Dabei wurde die überproportionale Erhöhung des Ionenstromes am Pulsanfang untersucht (siehe Abb. 3-12). Es ist daher möglich, eine optimale Pulsdauer zur Ausnutzung dieser Ionenstromüberhöhung für eine Steigerung der Beschichtungsrate zu verwenden. Dies war jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Die Änderung der Pulshöhe zeigte ebenfalls einen Einfluss. Jedoch konnte kein allgemeiner Zusammenhang für die verwendeten Targetmaterialien festgestellt werden. Während z. B. für das Chrom-Target bei $I_p = 500$ A die Beschichtungsrate bei der Anwendung eines synchronisierten Magnetfeldes höher lag (Abb. 6-27), war sie unter Verwendung eines Titan-Aluminium-Targets für den gleichen Pulsstrom bei Anwendung eines permanenten Magnetfeldes höher (Abb. 6-28). Bei einem Titan-Target war

kaum ein Unterschied zwischen synchronisiertem und permanentem Magnetfeld bei $I_p = 500$ A erkennbar (Abb. 6-26).

Die Abb. 6-29 bis 6-31 zeigen die Abhängigkeit des Massenerosionskoeffizienten von den verwendeten Pulsparametern und der Art des Magnetfeldes. Auf den Massenerosionskoeffizienten hatte die Art des verwendeten Magnetfeldes (synchron oder DC) nur wenig Einfluss.

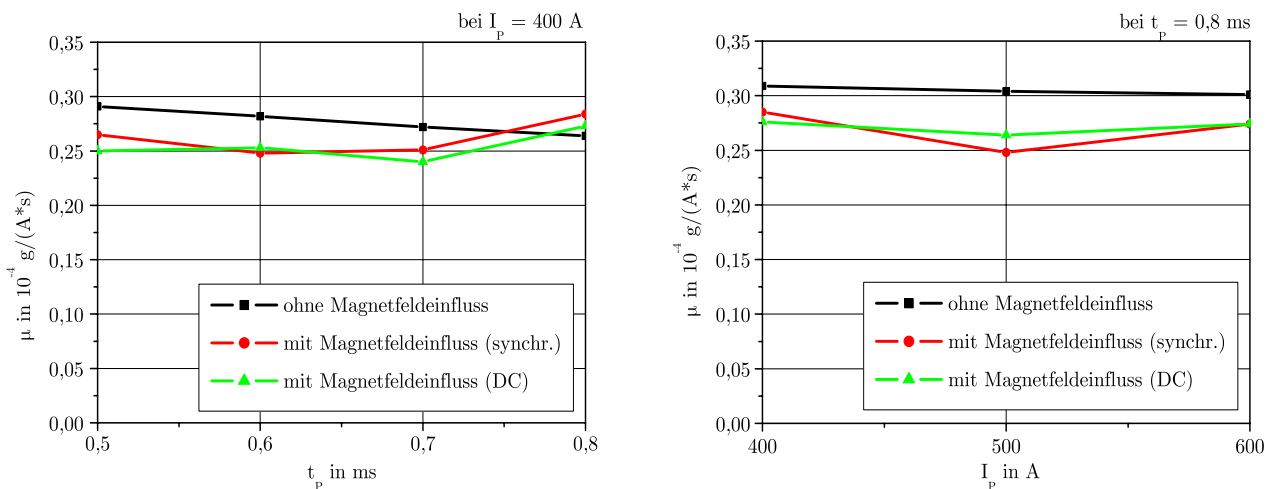


Abb. 6-29 Abhängigkeit des Massenerosionskoeffizienten von verschiedenen Pulsparametern beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Titan-Targets
($p = 1$ Pa, N_2 ; $I_{mag} = 0$ A / 8 A)

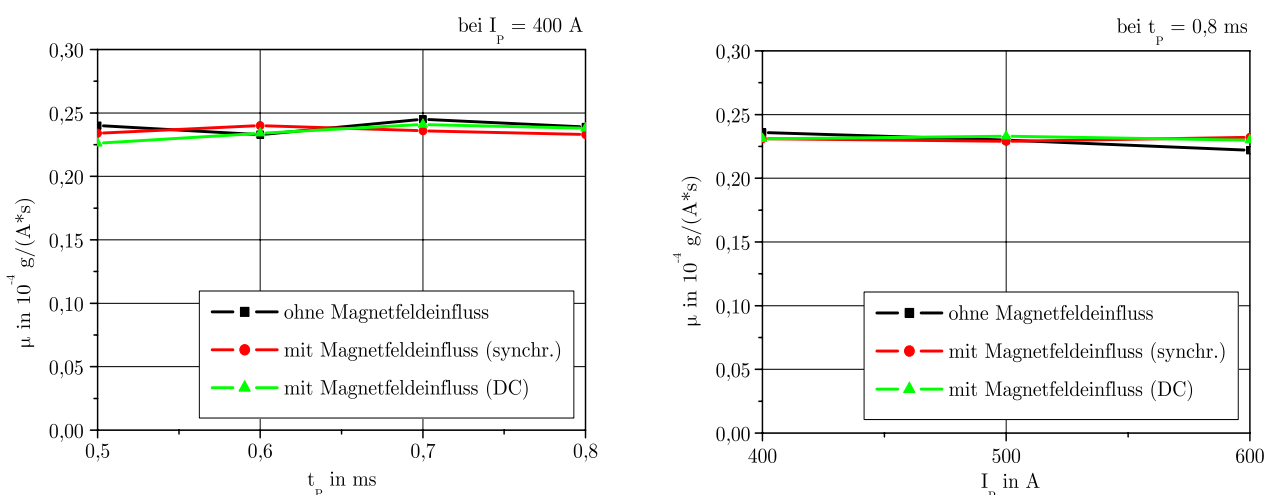


Abb. 6-30 Abhängigkeit des Massenerosionskoeffizienten von verschiedenen Pulsparametern beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Chrom-Targets
($p = 1$ Pa, N_2 ; $I_{mag} = 0$ A / 8 A)

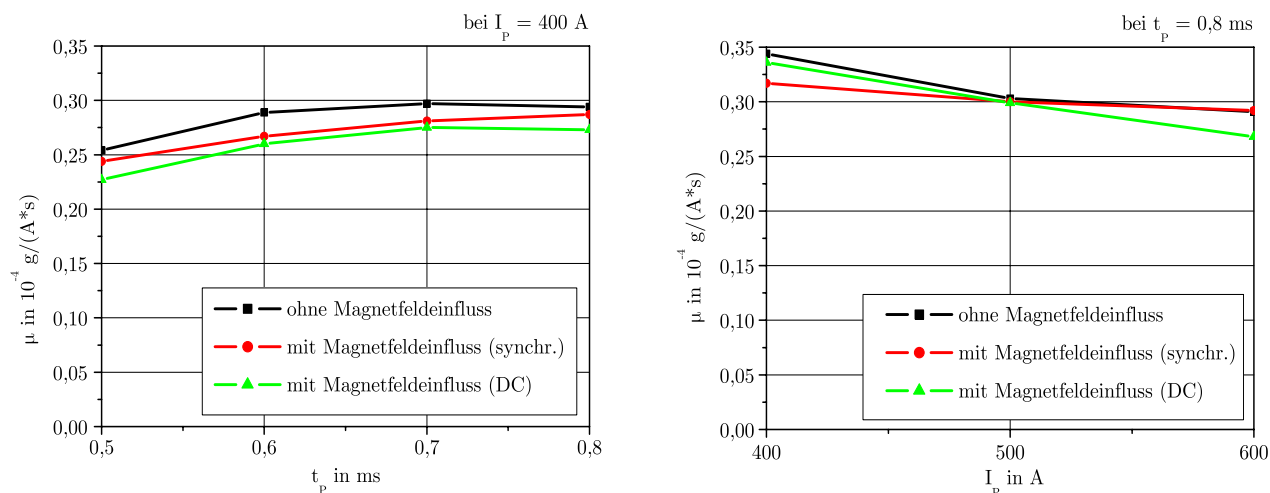


Abb. 6-31 *Abhängigkeit des Massenerosionskoeffizienten von verschiedenen Pulsparametern beim modifiziertem Puls-Arc-Verfahren bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Titan-Aluminium-Targets ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$)*

Für Titan und Titan-Aluminium konnte unter Magnetfeldeinfluss ein Absinken des Massenerosionskoeffizienten beobachtet werden.

Bei Chrom als Targetmaterial wurde kein Unterschied zwischen den Massenerosionskoeffizienten in Abhängigkeit von der Art des Magnetfeldes bzw. ohne Magnetfeld ermittelt (Abb. 6-30). Daher wurde für ein Chrom-Target eine erneute Ionenstromuntersuchung für die unterschiedlichen Arten des Magnetfeldeinflusses bzw. ohne Magnetfeldeinfluss bei gleichen Pulsparametern durchgeführt, um eine mögliche fehlerbehaftete Magnetfelderzeugung auszuschließen.

Die Abb. 6-32 zeigt, dass an den Sonden 0° und $22,5^\circ$ unterschiedliche Mittelwerte des Ionenstromes für die betrachteten Prozesse gemessen wurden. Der Vergleich von synchronisiertem und durchgängigem Magnetfeld bestätigte die Tendenz der ermittelten Werte der Beschichtungsrate. Es ergab sich eine Erhöhung des Ionenstromes und folglich der Beschichtungsrate bei Verwendung des synchronisierten Magnetfeldes im Vergleich zu einem durchgängig wirkenden Magnetfeld gleicher Höhe. Nach wie vor ergab sich jedoch kein sichtbarer Einfluss auf den Massenerosionskoeffizienten bei Verwendung des Chrom-Target. Eine mögliche Erklärung dafür wäre das Vorhandensein von Mehrfachladungen, die sich auf den Ionenstromverlauf bzw. auf die Beschichtungsrate in Verbindung mit der verwendeten Biasspannung auswirkte, jedoch zu keinem größeren Massenabtrag am Target führte.

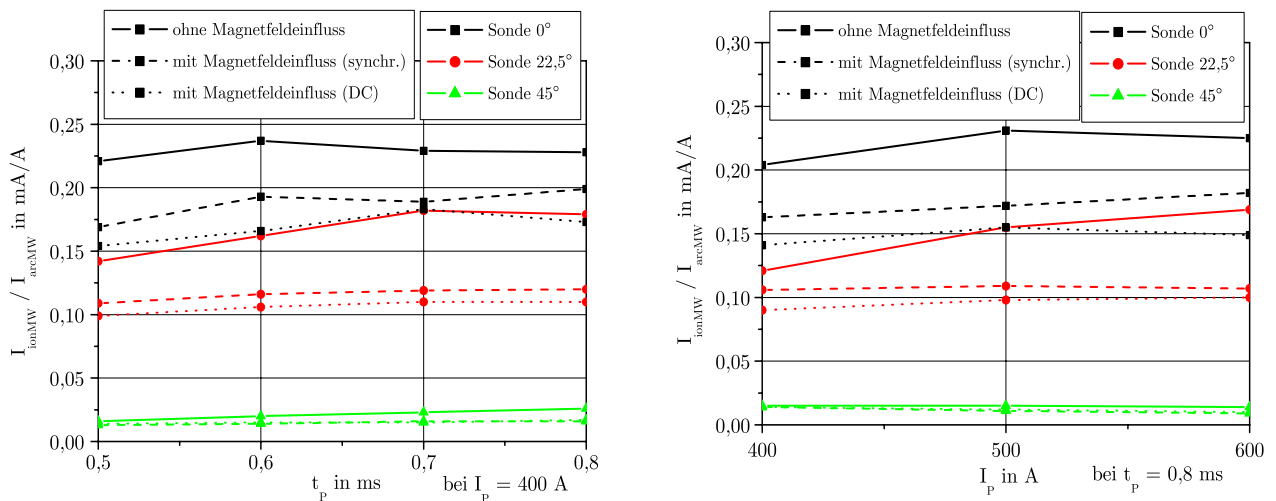


Abb. 6-32 Mittelwert des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für einen modifizierten Puls-Arc-Prozess bei verschiedenen Magnetfeldern und Verwendung eines Titan-Targets ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$)

Um die Auswirkungen der Prozesse im Hinblick auf die räumliche Verteilung der Beschichtung zu untersuchen, wurde ein 22 cm x 2 cm großes Substrat in einem Abstand von 180 mm zum Target mit den drei Targetmaterialien beschichtet. Die Prozesse liefen bei einem vergleichbaren arithmetischen Mittelwert des Bogenstromes ($I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$) ab. Die Ergebnisse sind den Abb. 6-33 bis 6-35 zu entnehmen.

Der Einfluss des Magnetfeldes führte beim Random-Arc-Prozess und beim modifiziertem Puls-Arc-Prozess bei allen drei Targetmaterialien zu kleineren Werten der Schichtdicke. Der Steered-Arc-Prozess lieferte dabei erwartungsgemäß die geringsten Beschichtungsraten. Die Pulsprozesse führten im Vergleich zu den Gleichstromprozessen zu einer Erhöhung der Beschichtungsraten unabhängig davon, ob ein Magnetfeldeinfluss bestand oder nicht.

Der Einsatz eines Magnetfeldes beim modifiziertem Puls-Arc-Prozess verringerte vor allem im Bereich senkrecht über dem Target die Schichtdicke. Die für einen Pulsprozess typische Plasmafokussierung wurde durch den Einsatz der Magnetspule abgeschwächt. Die resultierende Schichtdicke verringerte sich durch den Magnetfeldeinfluss.

Die gemessenen Schichtdicken zeigten weiterhin, dass die Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes einen Anstieg der Beschichtungsraten im Vergleich zu einem durchgängigen, auch während der Pulsphase des Prozesses bestehenden Magnetfeld, bewirkte. Dies wurde vor allem bei Verwendung eines Titan-Targets deutlich (Abb. 6-33). Während der Einsatz eines durchgängigen, auch während der Pulsphase des Prozesses bestehenden Magnetfeldes eine Verringerung der

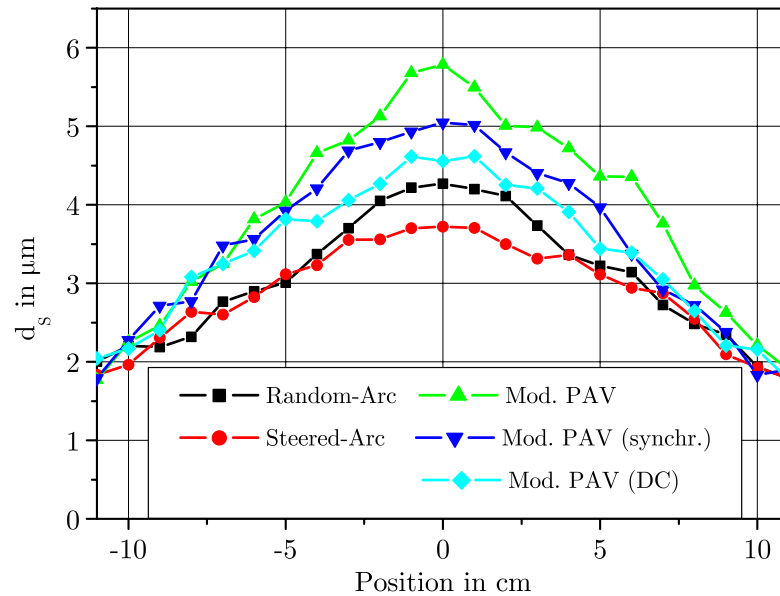


Abb. 6-33 Schichtdickenverteilung einer TiN-Beschichtung bei den verschiedenen Verfahren mit gleichem Mittelwert des Bogenstromes
 ($I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; Abstand Target - Substrat: 180 mm;
 $t_{\text{Besch}} = 7,5 \text{ min}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$)

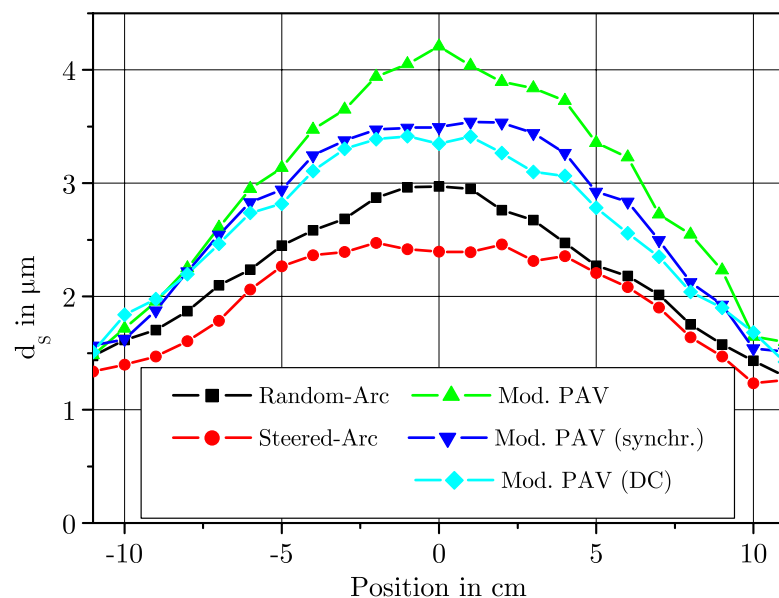


Abb. 6-34 Schichtdickenverteilung einer CrN-Beschichtung bei den verschiedenen Verfahren mit gleichem Mittelwert des Bogenstromes
 ($I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; Abstand Target - Substrat: 180 mm;
 $t_{\text{Besch}} = 7,5 \text{ min}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$)

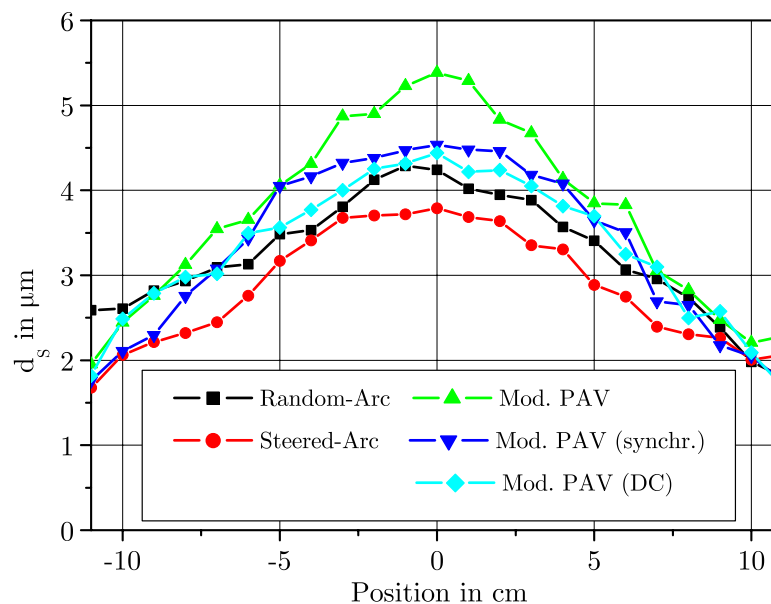


Abb. 6-35 Schichtdickenverteilung einer TiAlN-Beschichtung bei den verschiedenen Verfahren mit gleichem Mittelwert des Bogenstromes
 ($I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; Abstand Target - Substrat: 180 mm;
 $t_{\text{Besch}} = 7,5 \text{ min}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$)

Schichtdicke auf dem gesamten Substrat von ca. 16 % verursachte, wurde für ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld nur eine Verringerung der Schichtdicke von ca. 9 % ermittelt, also eine um ca. 7 % verbesserte Beschichtungsrate. Für die anderen Targetmaterialien wurde eine geringere Steigerung beim Einsatz eines synchronisierten Magnetfeldes erzielt (Chrom: ca. 3,5 %; Titan-Aluminium: ca. 1,2 %). Für den prozentualen Vergleich der einzelnen Prozesse wurden die Mittelwerte der Schichtdicke über die gesamte Ausdehnung des Substrates zugrunde gelegt.

Mithin bewirkte die Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes eine Steigerung der Beschichtungsrate im Vergleich zu einem permanent wirkenden Magnetfeld (Permanentmagnet oder von Gleichstrom durchflossene Spule). Dem Nachteil einer verringerten Beschichtungsrate beim Einsatz von Permanentmagnetfeldern wird durch die Synchronisation des Magnetfeldes auf den gepulsten Bogenstrom entgegengewirkt.

6.3.4 Schichthärte

Der Einfluss auf die Härte und den Reduced Modulus wurde durch das in Abschnitt 4.2.2 erläuterte Nanoindenter-Verfahren an einer Reihe von TiN-Beschichtungen untersucht. Die Messungen erfolgten vollautomatisch mit Hilfe des Nano-Test-Systems. Es wurden in einem Messvorgang 25 Einzelmessungen in der vorgegebenen Messmatrix (Größe: $125\ \mu\text{m} \times 125\ \mu\text{m}$) durchgeführt. Sogenannte „Ausreißer“ blieben unberücksichtigt, wenn ihr Wert um mehr als $\pm 5\%$ vom mittleren Kurvenverlauf der restlichen Messpunkte abwich.

Die Tabelle A25 des Anhanges beinhaltet die ermittelten Werte. Der Abstand des Substrates (polierte Stahlrunde) vom Target betrug während der Beschichtungen 220 mm. Für die betrachteten Prozesse wurden jeweils Messungen ohne Magnetfeld sowie mit auf den Bogenstrom synchronisierten gepulstem Magnetfeld als auch einem durchgängig während der Pulsphase wirkenden Magnetfeld untersucht und ausgewertet.

Beim Vergleich von Random-Arc- und Steered-Arc-Prozessen wurde eine Verringerung der Härte für die Schichten, die durch die Steered-Arc-Prozesse erzeugt wurden, festgestellt. Die Werte der Härte für einen Steered-Arc-Prozess lagen im Bereich, der auch von Ives et al [092] ermittelt wurde (Ives: $HV = 2110$; eigene Messungen: $HV_{0,002} = 2072$ bei $I_{DC} = 120\ \text{A}$ und $I_{mag} = 8\ \text{A}$). Desweiteren wurde sowohl für die Härte als auch für den Reduced Modulus bei einem höherem Bogenstrom ein größerer Einfluss eines Magnetfeldes festgestellt. Die Werte verringerten sich stärker (siehe Tab. A25). Für einen Bogenstrom von $120\ \text{A}$ (DC) wurde eine Abnahme der Härte um ca. 14% und des Reduced Modulus um ca. 12% ermittelt.

Die Auswertung der gemessenen Werte der Härte für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren ergab, dass sowohl die Pulsparameter des Bogenstromes, als auch die Art des verwendeten Magnetfeldes einen Einfluss haben.

Bei der Betrachtung von Abb. 6-36 kann festgestellt werden, dass ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld für eine hohe Härte der Beschichtung von Vorteil ist. Ein permanent wirkendes Magnetfeld verschlechterte tendenziell die Härtewerte. Selbst bei einem Vergleich mit dem modifizierten Puls-Arc-Prozess ohne Magnetfeldeinfluss wurden geringere Härtewerten ermittelt. Für den modifizierten Puls-Arc-Prozess führte im Gegensatz zum Random-Arc-Prozess der zusätzliche Einsatz eines Magnetfeldes zu einer Erhöhung der Härte der Beschichtung. Beim Vergleich von Random-Arc- und Steered-Arc-Prozess war es umgekehrt. Auch bei der Variation der Pulsstromhöhe

konnte dieses Verhalten für die meisten der verwendeten Pulsparameter beobachtet werden. Bei einem modifiziertem Puls-Arc-Prozess ($I_G = 80 \text{ A}$, $I_P = 200 \text{ A}$, $t_p = 0,8 \text{ ms}$, $f_p = 200 \text{ Hz}$, $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$) mit auf den Bogenstrom synchronisiertem Magnetfeld zeigte sich im Vergleich zu einem Steered-Arc-Prozess ($I_{\text{DC}} = 120 \text{ A}$; $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$) die größte Erhöhung der Härte um ca. 45 %.

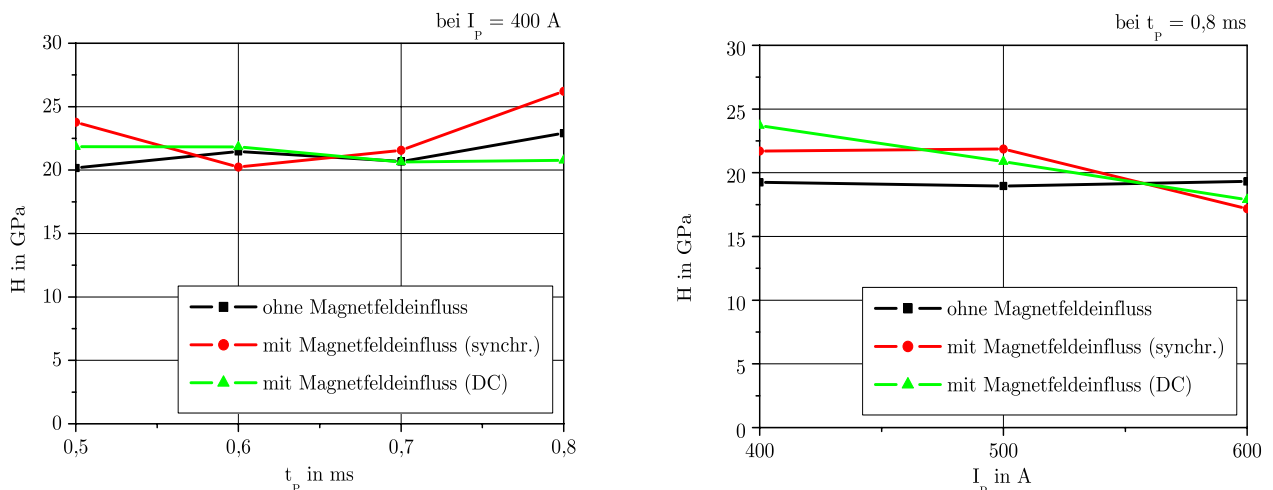


Abb. 6-36 Abhängigkeit der Härte (H) von verschiedenen Parametern des Bogenstromes und der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer TiN-Beschichtung ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$)

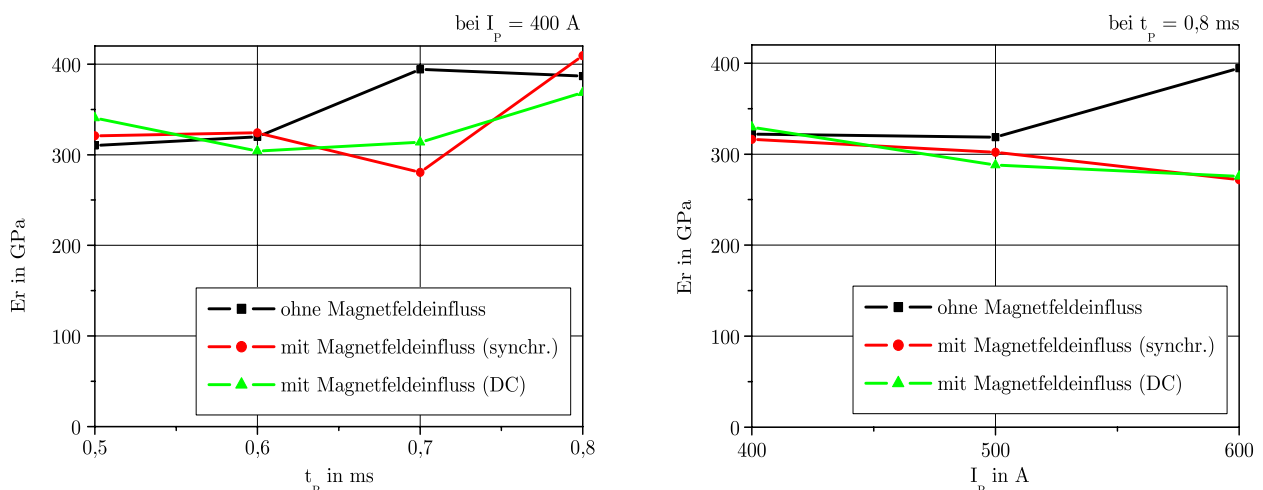


Abb. 6-37 Abhängigkeit des Reduced Modulus (E_r) von verschiedenen Parametern des Bogenstromes und der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer TiN-Beschichtung ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$)

Bei der Analyse von Random-Arc- und Steered-Arc-Prozessen wurde auch eine Verringerung des Reduced Modulus für die Schichten, die durch die Steered-Arc-Prozesse

erzeugt wurden, festgestellt. Für den Reduced Modulus bedeutete die Verwendung eines Magnetfeldes während des modifizierten Puls-Arc-Prozesses ebenfalls fast immer eine Verringerung der Werte (Abb. 6-37). Es konnte jedoch keine generelle Aussage über den Einfluss der Pulsparameter und der Art des verwendeten Magnetfeldes auf den Reduced Modulus getroffen werden. Er war je nach verwendeten Pulsparametern entweder für ein synchronisiertes oder ein permanentes Magnetfeld höher. Bei einem modifiziertem Puls-Arc-Prozess ($I_G = 80 \text{ A}$, $I_P = 200 \text{ A}$, $t_p = 0,8 \text{ ms}$, $f_p = 200 \text{ Hz}$, $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$) mit auf den Bogenstrom synchronisiertem Magnetfeld zeigte sich im Vergleich zu einem Steered-Arc-Prozess ($I_{\text{DC}} = 120 \text{ A}$; $I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$) eine maximale Erhöhung des Reduced Modulus um ca. 38 %.

Es lässt sich feststellen, dass der Einsatz eines Magnetfeldes einen Beitrag zur Erhöhung der Schichthärte und gegebenenfalls des Reduced Modulus beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren leisten kann. Eine Synchronisation des Magnetfeldes auf den Bogenstrom ist dabei von Vorteil, da bei den Untersuchungen mit einem Permanentmagneten oder einem permanent wirkenden Magnetfeld durch die Spule und Titan als Targetmaterial eine Verringerung der Schichthärte festgestellt wurde.

6.3.5 Dropletmission

In diesem Abschnitt wird die Auswirkung des durch die Magnetspule erzeugten Magnetfeldes auf die Dropletmission für die Beschichtungen mit den unterschiedlichen Targetmaterialien vorgestellt. Dazu wurden Versuche durchgeführt, bei denen mit der im Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Vorgehensweise die Oberflächen der beschichteten Stahlronden untersucht wurden.

Für die verschiedenen Targetmaterialien wird in der Literatur von einem in Abhängigkeit von der Höhe der Schmelztemperatur des Materials unterschiedlichen Verhalten bei der Dropletmission berichtet [093]. Je höher der Schmelzpunkt des Targetmaterials liegt, desto kleiner ist der zu erwartende maximale Durchmesser der Droplets (TiAl: 1450 °C ; Ti: 1660 °C ; Cr: 1870 °C). Dies wurde auch bei den eigenen Messungen beobachtet. Die CrN-Beschichtungen wiesen eine geringere Dropletbelastung als die TiN-Beschichtungen auf.

In Abb. 6-38 ist der Flächenanteil der Droplets für die TiN-Beschichtungen im Verhältnis zur betrachteten Gesamtoberfläche in Abhängigkeit von ausgewählten Pulsparametern des Bogenstromes und der Wirkung von Magnetfeldern gezeigt. Es wurde festgestellt, dass sich der Dropletanteil unter Magnetfeldeinfluss im Vergleich zum Verfahren ohne

Magnetfeldbeeinflussung bei fast allen verwendeten Pulsparametern verringerte. Dieses Verhalten ist für die Anwendung von Magnetfeldern bei der Arc-Beschichtung bekannt und deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren [038].

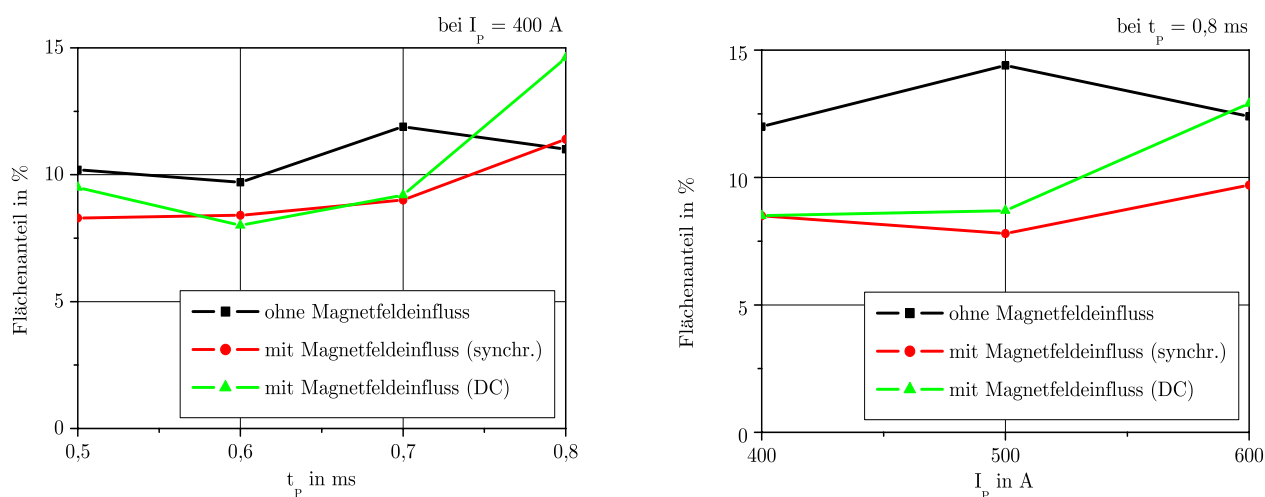


Abb. 6-38 Gesamtflächenanteil der Droplets in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern des Bogenstromes und der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer TiN-Beschichtung ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm)

Für die Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes oder eines permanent wirkenden Magnetfeldes ergaben sich jedoch Unterschiede. Es zeigte sich, dass bei der TiN-Beschichtung ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld meist eine geringere Dropletmission zur Folge hatte als ein permanent wirkendes Magnetfeld. Je nach verwendeten Pulsparametern ergaben sich Verringerungen des Gesamtflächenanteiles der Droplets zwischen synchronisiertem und permanentem Magnetfeldeinfluss von bis zu 30 %. Bei einem synchronisiertem Magnetfeldeinfluss steigerte sich der Dropletanteil bei Erhöhung der Pulsdauer und auch bei Erhöhung des Pulsstromes (Abb. 6-38, rote Kennlinien) allerdings weniger als beim Einsatz eines Dauermagnetfeldes (Abb. 6-38, grüne Kennlinien).

In Tab. A26 sind die Werte für die ermittelten Flächenanteile der Droplets nach ihrer Größe sortiert angegeben. Der größte Anteil der entstehenden Droplets lag für alle betrachteten Prozesse bei einer Größe zwischen 2 bis 5 μm . Droplets mit einer Größe ab 20 μm traten nur selten auf. Sie konnten meist nur beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren ohne Magnetfeldeinfluss beobachtet werden und lieferten nur einen geringen Beitrag zum Gesamtoberflächenanteil der Droplets.

Als nächstes wurden die Untersuchungen an den mit den gleichen Randbedingungen (Pulsparameter, Magnetfeldeinfluss) erzeugten CrN-Beschichtungen durchgeführt. Insgesamt wurde nur ein geringer Dropletanteil für dieses Targetmaterial ermittelt. Die Werte lagen maximal bei 4,5 % Flächenanteil. In Abb. 6-39 ist der Flächenanteil der Droplets für die CrN-Beschichtungen im Verhältnis zur betrachteten Gesamtoberfläche in Abhängigkeit von ausgewählten Pulsparametern des Bogenstromes und der Wirkung von Magnetfeldern gezeigt.

Auch hier wurde festgestellt, dass sich der Dropletanteil unter Magnetfeldeinfluss im Vergleich zum Verfahren ohne Magnetfeldeinfluss bei fast allen verwendeten Pulsparameter verringerte. Es zeigte sich auch hier, ähnlich zur TiN-Beschichtung, dass bei der CrN-Beschichtung ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld meist eine geringere Dropletmission zur Folge hatte als ein permanent wirkendes Magnetfeld.

In der Tab. A27 sind die Werte für die ermittelten Flächenanteile der Droplets nach ihrer Größe sortiert angegeben. Der größte Teil der entstandenen Droplets hatte für alle betrachteten Prozesse eine Größe zwischen 1 und 2 μm . Droplets größer als 20 μm sind nicht entstanden.

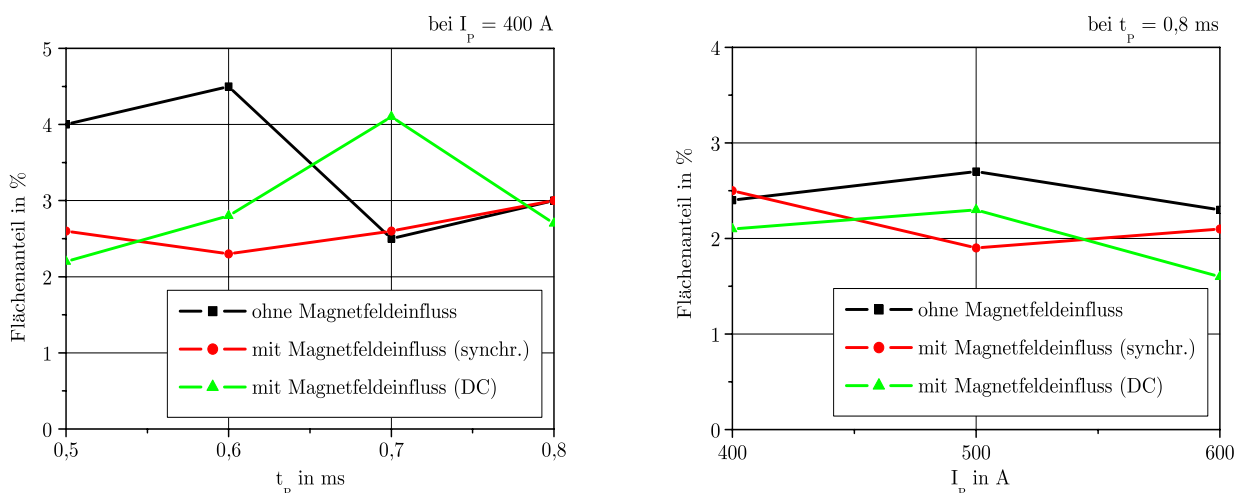


Abb. 6-39 Gesamtflächenanteil der Droplets in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern des Bogenstromes und der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer CrN-Beschichtung ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; $I_{\text{mag}} = 0 \text{ A} / 8 \text{ A}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm)

Die Auswertung der TiAlN-Beschichtungen war nach der in Abschnitt 4.2.3 beschrieben und für die TiN- und CrN-Beschichtungen angewendeten Methode

nicht möglich. Die unter dem Auflichtmikroskop angefertigten Aufnahmen für die verschiedenen Prozessparameter konnten nicht verglichen werden, da die Einstellung der Tiefenschärfe durch die unterschiedlichen Schichtstrukturen (Höhe) nicht für alle Aufnahmen reproduzierbar war. Je nach Einstellung der Tiefenschärfe veränderten sich die zu erkennenden Droplets (siehe Abb. 6-40).

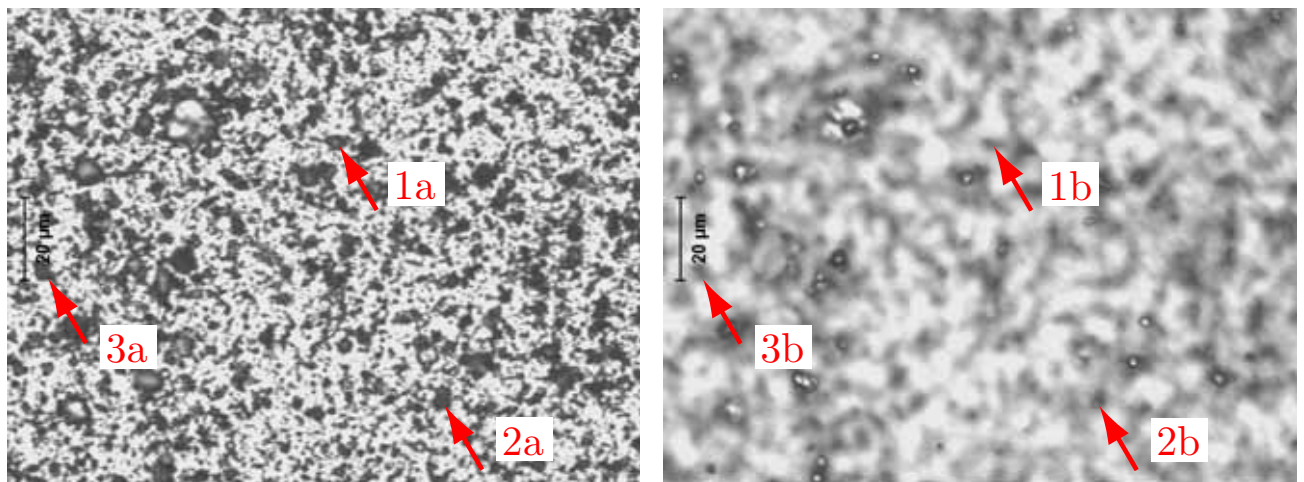


Abb. 6-40 Aufnahme des gleichen Bildausschnittes einer TiAlN-Beschichtung bei unterschiedlicher Einstellung der Tiefenschärfe des Auflichtmikroskops (Die Punkte 1a, 2a, ud 3a entsprechen den Punkten bei 1b, 2b und 3b mit unterschiedlicher Einstellung der Tiefenschärfe des Mikroskops.)

Die TiAlN-beschichteten Proben zeigten jedoch eine sehr dichte Struktur. Insgesamt überwiegen hauptsächlich kleinere Droplets, die jedoch eine unterschiedliche Höhengausdehnung aufweisen. Demzufolge sind nach Veränderung der Fokuseinstellung in jeder Fokusebene andere Droplets erkennbar, was wiederum eine Analyse, sowohl manuell als auch automatisch, unmöglich machte.

Zusammenfassend hat die Analyse der Droplets bei den TiN- und den CrN-Beschichtungen ergeben, dass sich unter Anwendung eines Magnetfeldes beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren der Dropletanteil im Vergleich zum Verfahren ohne Magnetfeld bei fast allen verwendeten Pulsparametern verringerte. Die Verwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes im Vergleich zu einem permanent wirkenden Magnetfeld zeigte, dass ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld meist eine geringere Dropletmission zur Folge hatte als ein permanent wirkendes Magnetfeld.

6.3.6 Targetausnutzung

Eine qualitative Bewertung der Targetausnutzung soll anhand der Abb. 6-41 gezeigt werden. Die dargestellten Targets haben jeweils die gleichen Versuchsreihen durchlaufen. Dabei wurde auch der Spulenstrom in seiner Höhe verändert. Der resultierende, schwach gesteuerte Bogen hat dabei die Fußpunkte eine große Fläche überstreichen lassen. Es findet sich, im Gegensatz zu den Untersuchungen mit den Permanentmagneten (siehe Abb. 5-18) kein „konzentrierter Graben“. Dies wirkt sich sehr günstig auf die Targetausnutzung aus.

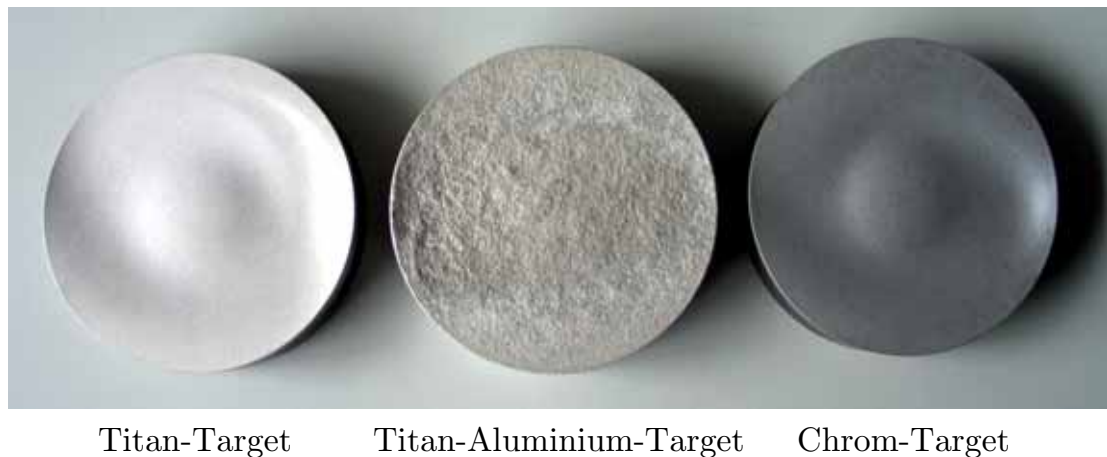


Abb. 6-41 Targetoberflächen nach Beschichtungsversuchen beim Einsatz der Magnetspule

Beim Ti- bzw. Cr-Target ist eine zum TiAl-Target unterschiedliche Targeterosion erkennbar. Die Fußpunkte überstreichen einen bevorzugten Bereich, der durch den Magnetfeldeinfluss bestimmt wird. Bei Titan-Aluminium führten die Fußpunkte hingegen eine sehr unregelmäßige, sprunghafte Bewegung aus, die von der durch das Magnetfeld vorgegebenen Kreisbahn abwich. Dieses Verhalten wurde auch schon beim Einsatz des Permanentmagneten beobachtet (siehe Abb. A2).

Es lässt sich anhand der gemachten Beobachtungen feststellen, dass die Verwendung einer Magnetspule an Stelle eines Permanentmagneten beim Einsatz eines Ti- oder Cr-Targets Vorteile für die Targetausnutzung erbringt. Bei einem TiAl-Targets wird die Ausnutzung durch das „unregelmäßige“ Laufverhalten der Fußpunkte bei einem schwach gesteuerten Lichtbogen zusätzlich unterstützt.

7 Zusammenfassung

Gegenstand der Arbeit waren Untersuchungen der magnetischen Beeinflussung eines modifizierten Puls-Arc-Prozesses. Dazu wurden externe statische und veränderliche Magnetfelder während dieses Arc-Beschichtungsprozesses angewendet. Es ergab sich dadurch eine Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Prozess. Mit dieser Verfahrenskombination wurde eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen durchgeführt, die zu einem besseren Verständnis der Anwendung von externen Magnetfeldern zur Beeinflussung von Pulsprozessen bei Vakuumbogenentladungen führen sollten. Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Prozesse, also den Random-Arc-Prozess, den Steered-Arc-Prozess, den modifiziertem Puls-Arc-Prozess und die Verfahrenskombination, wurden miteinander verglichen und bewertet.

Zu Beginn der Untersuchungen wurden Magnetfeldsimulationen durchgeführt, um ein resultierendes Magnetfeld für verschiedene geometrische Verhältnisse beim Einsatz von Permanentmagneten und Magnetspulen zu optimieren. Das Laufverhalten der Fußpunkte auf einer Katodenoberfläche während einer Vakuumbogenentladung kann durch ein externes Magnetfeld beeinflusst werden. Es ist möglich, die Bahn der Fußpunkte durch die Formung der Feldlinien eines externen Magnetfeldes festzulegen.

Für die Verwendung einer Magnetspule war es weiterhin erforderlich, eine Stromversorgung zu entwickeln und aufzubauen. Da in dieser Arbeit gepulste Prozesse eingesetzt wurden, war es notwendig, mit Hilfe der Stromversorgung sowohl statische als auch gepulste Magnetfelder zu erzeugen. Für den Einsatz der Magnetspule bei gepulsten Prozessen wurde daher eine Mikrocontroller-Steuerung realisiert, mit der es möglich war, eine Synchronisation des fließenden Spulenstromes auf den Bogenstrom von gepulsten Prozessen vorzunehmen. Mit den so geschaffenen Möglichkeiten der magnetischen Beeinflussung wurden die Experimente durchgeführt.

Die optischen Untersuchungen des Laufverhaltens der Fußpunkte erbrachten den Nachweis zur korrekten Funktion des Systems. Die bei der Simulation berechneten Bahnen der Fußpunkte für den Einsatz von Permanentmagneten und der Magnetspule mit ihrer Stromversorgung konnten bestätigt werden.

Der Einsatz der Verfahrenskombination bewirkte eine beschleunigte Bewegung der Spots alternierend um die durch den Permanentmagneten bzw. die Magnetspule erzeugte kreisförmige „DC-Spur“. Durch eine Erhöhung der Geschwindigkeiten der

Fußpunkte und damit einer Vermeidung lokaler Überhitzungen wurde eine Reduzierung der Dropletmission bei der Verfahrenskombination im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren erreicht.

Der einstellbare Spulenstrom ließ Untersuchungen zur Stabilität der Kreisbahn zu. Der Spulenstrom sollte dabei nur in der Grundstromphase des Bogenstromes fließen, während er in der Pulsphase des Bogenstromes generell null war. Zur Ausbildung einer definierten Kreisbahn wurden die mindestens notwendigen Magnetströme für die Anordnung bestimmt. Ferner wurde die Variation der Spulenstromdauer in der Grundstromphase untersucht. Eine Unterbrechung der Magnetfeldführung in der Grundstromphase zeigte jedoch eine zunehmend ungleichmäßige Fußpunktbeziehung. Die Kreisbahn wurde durch die Verringerung der Spulenstrompulsdauer während der Grundstromphase nicht mehr eingehalten, was für eine kontrollierte Fußpunktbeziehung und damit einem definierten Ausgangspunkt für die Teilung der Fußpunkte in der jeweils folgenden Pulsphase ungünstig war. Es ergibt sich die Schlussfolgerung, dass während der gesamten Grundstromphase ein Magnetfeld vorhanden sein soll.

Die Bewertung der Ionenstromverteilung hat ergeben, dass die Verfahrenskombination zu einer Veränderung der Emissionscharakteristik des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens führt. Die starke Fokussierung des Plasmas wurde durch die Wirkung des Magnetfeldes abgeschwächt. Der Magnetfeldeinfluss drängte die Fußpunkte nach außen auf eine Kreisbahn und die Beschichtungsrate senkrecht über dem Target nahm ab. Dieses unterstrich auch die gemessene Ionenstromverteilung und eine Vermessung der Schichtdickenverteilung bei großen Substraten. Es konnte somit nachgewiesen werden, dass eine Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren zu einer Veränderung der Schichtdickenverteilung führt.

Die Ionenstrommessungen haben weiterhin gezeigt, dass ein vorhandenes Magnetfeld bei einem Steered-Arc-Prozess eine Verringerung der Mittelwerte des Ionenstromes im Vergleich zum Random-Arc hervorriefen. Es war aber ebenfalls erkennbar, dass dieser Tendenz, je nach verwendetem Targetmaterial, durch Anwendung eines gepulsten Prozesses mit einem auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeld entgegengewirkt werden kann.

Eine Erhöhung der Beschichtungsrate durch eine Verfahrenskombination im Vergleich zum Random-Arc konnte ebenfalls beobachtet werden. Die Anwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes bewirkte eine Steigerung der Beschichtungsrate im Vergleich zu einem permanent wirkenden Magnetfeld. Dem Nachteil einer verringerten Beschichtungsrate beim Einsatz von Permanentmagnetfeldern

wird so durch die Synchronisation eines Magnetfeldes auf den gepulsten Bogenstrom entgegengewirkt.

Die Werte der Schichthärte schwankten je nach verwendetem Targetmaterial und Prozessparametern. Bei der Verwendung von Titan und der Anwendung eines Permanentmagneten kam es bei der Verfahrenskombination im Vergleich zum modifizierten Puls-Arc-Verfahren zu einer Verringerung der Schichthärte. Für Chrom hingegen konnte auch je nach verwendeten Pulsparametern eine Steigerung beobachtet werden. Es lässt sich daher feststellen, dass der Einsatz eines Magnetfeldes einen Beitrag zur Erhöhung der Schichthärte und des Reduced Modulus beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren leisten kann. Eine Synchronisation des Magnetfeldes auf den Bogenstrom wirkte sich vorteilhaft aus, da bei vergleichbaren Untersuchungen mit einem Permanentmagneten oder einem permanent wirkenden Magnetfeld (von Gleichstrom durchflossene Magnetspule) eine Verringerung der Schichthärte bei TiN-Beschichtungen auftrat.

Eine Bewertung der Droplets am Beispiel von CrN-Beschichtungen hat gezeigt, dass bei der Verfahrenskombination durch die Anwendung eines Permanentmagneten, wie auch beim Steered-Arc-Prozess, keine Droplets größer als 10 μm entstanden sind. Je nach gewählten Pulsparametern wurde durch Anwendung der Verfahrenskombination die Dropletmission verringert. Bei der Verwendung der Magnetspule ergab die Analyse der Droplets für TiN- und CrN-Beschichtungen, dass sich unter Anwendung eines Magnetfeldes beim modifizierten Puls-Arc-Verfahren der Dropletanteil im Vergleich zum Verfahren ohne Magnetfeldbeeinflussung bei fast allen verwendeten Pulsparametern verringerte. Es gab jedoch im Vergleich zur Anwendung des Permanentmagneten einen geringen Anteil von Droplets größer als 10 μm . Die Verwendung eines auf den Bogenstrom synchronisierten Magnetfeldes im Vergleich zu einem permanent wirkenden Magnetfeldes zeigte, dass ein auf den Bogenstrom synchronisiertes Magnetfeld meist eine geringere Dropletmission zur Folge hatte.

Die Targetausnutzung war durch die Wirkung eines Permanentmagneten nicht optimal. Nach den Beschichtungsversuchen wurde ein deutlicher Erosionsgraben auf der Targetoberfläche sichtbar. Als problematisch hat sich in diesem Zusammenhang erwiesen, dass es nicht möglich war, die Stärke des Magnetfeldes an die Prozessbedingungen, im speziellen an die Grund- und Pulsstromphase, anzupassen. Eine Maßnahme zur Verbesserung der Targetausnutzung sollte daher der Einsatz einer Magnetspule, die eine Anpassung des Magnetfeldes an den gepulsten Prozess zulässt, darstellen. Die Anwendung eines synchronisierten Magnetfeldes hat auf die Targetausnutzung positive

Auswirkungen gezeigt. Der nur in der Grundstromphase schwach gesteuerte Bogen und die während der Pulsphase auseinanderstrebenden Fußpunkte haben einer konzentrierten Kreisbahn und einem damit verbundenen konzentrierten Abtrag entgegengewirkt. Der Erosionsgraben war bei weitem nicht so stark ausgeprägt wie bei der Anwendung eines Permanentmagneten.

8 Ausblick

Die durchgeführten Untersuchungen eröffnen der Kombination des Steered-Arc-Verfahrens und des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens in der PVD-Beschichtung neue Möglichkeiten.

Durch die Anwendung veränderlicher, an einen gepulsten Prozess angepasster Magnetfelder werden die Beschichtungseigenschaften beeinflusst. Je nach gewünschten Eigenschaften ist die Anwendung einer Verfahrenskombination von Steered-Arc- und modifiziertem Puls-Arc-Prozess möglich. Dabei kann in Zukunft die Anpassung der Magnetfelder an gepulste Prozesse Vorteile für eine Beschichtung erbringen. Der Einsatz von Magnetspulen hat sich im Gegensatz zum Permanentmagneten als vorteilhaft erwiesen. Das System ist variabler und kann, ohne konstruktive Änderungen am Verdampfer, über die Einstellung des Magnetfeldes an den jeweiligen Prozess angepasst werden. Der Aufwand für eine notwendige Spulenversorgung ist dabei technisch und wirtschaftlich ohne weiteres vertretbar.

Durch Simulationen ist es schon im Vorfeld möglich, ein zur Beeinflussung erforderliches Spulensystem an vorhandene Verdampfergeometrien anzupassen. Die resultierenden Magnetfelder können statisch bestimmt werden und zeigen durch die Berechnung der entsprechenden Komponenten der magnetischen Flussdichte die Bahn der Fußpunkte mit hinreichender Genauigkeit. Denkbar wäre in diesem Zusammenhang die Erweiterung der Simulationen über eine statische Berechnung hinaus. Für eine Betrachtung der dynamischen Vorgänge müsste jedoch die Umsetzung der physikalischen Vorgänge im Fußpunkt in für die Simulationen verwendbare Gleichungssysteme vorgenommen werden.

Eine Erweiterung der jetzigen Anordnung könnte auch durch die Verwendung von mehreren Spulen erfolgen. Eine Realisierung durch mehrere getrennte Windungen auf einem Spulenkörper oder auch durch Nutzung vieler einzelner Spulen bei großen Targets, die dann auf einen gepulsten Prozess angepasst werden könnten, wäre denkbar. Dadurch wäre es z. B. möglich, die Targeterosion weiter zu optimieren, unterschiedliche

Bereiche des Targets gezielt abzutragen oder auch die Verteilung der Schicht auf einem Substrat zu beeinflussen.

Die industrielle Anwendung veränderlicher Magnetfelder sollte für eine Erweiterung des Anwendungsbereiches der PVD-Verfahren sorgen. Bestehende Anlagen können ohne großen Aufwand mit der entsprechenden Technik ausgestattet werden. Wie diese Arbeit zeigt, kann mit relativ geringem technischen Aufwand eine positive Beeinflussung des Beschichtungsprozesses erzielt werden.

Literaturverzeichnis

- [001] Mattox, D.M.:
The foundations of vacuum coating technology.
Noyes Publications/William Andrew Publishing,
Norwich, New York USA 2003
- [002] Edison, T.A.:
Art of Plating One Material with Another.
U.S. Patent 526,147 (1884)
- [003] Rother, B.; Vetter, J.:
Plasmabeschichtungsverfahren und Hartstoffschichten.
Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1992
- [004] Ehrich, H.:
The anodic vacuum arc. 1. Basic construction and phenomenology.
J. Vac. Sci. Technol. A6 (1), Jan/Feb 1988
- [005] Martin, P.J.; McKenzie, D.R.; Netterfield, R.P.; Swift, P.; Filipczuk, S.W.;
Müller, K.H.; Pacey, C.G.; James, B.:
Characteristics of titanium arc evaporation processes.
Thin Solid Films, 153 (1987), S. 91 - 102
- [006] Jüttner, B.:
On the nature of arc cathode spots in vacuum and plasmas.
Plasma Physics and Controlled Fusion 26 (1984) 249
- [007] Vyskocil, J.; Musil, J.:
Cathodic arc evaporation in thin film technology.
J. Vac. Sci. Technol. A10 (4), Jul/Aug 1992
- [008] Vasin, A.I.:
Beiträge der 4. Gesamtsowjetischen Konferenz über Plasmabeschleuniger
VNTIZ GKNT, Moskau 1987, S. 390

- [009] Kutzner, J.; Glinkowski, M.:
Electron temperature and probe floating potentials in a plasma of the low-current vacuum arc.
IEEE Trans. Plasma Science PS11, 233 (1983)
- [010] Lafferty, J.M.:
Vakuumbögen.
New York, John Wiley & Sons, 1980
- [011] Vyskocil, J.; Musil, J.:
Arc evaporation of hard coatings: Process and film properties.
Surf. Coat. Technol. 43/44, 1990, S. 299
- [012] Sanders, D.M.; Boercker, D.B.; Falabella, S.:
Coating technology based on the vacuum arc-a review.
IEEE Trans. Plasma Science, 18, 1990, S. 883 - 894
- [013] Yushkov, G.Y.; Anders, A.; Oks, E.M.; Brown, I.G.:
Ion velocities in vacuum arc plasmas.
J. Appl. Phys. 88 (10), 2000, S. 5618 - 5622
- [014] Ellrodt, M.:
Einfluss elektrischer Parameter auf Vakuumbogenentladungen in PVD-Prozessen.
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation 1997
- [015] Kühn, M.:
Charakterisierung reaktiver Prozesse bei der katodischen Vakuumverdampfung.
TU Chemnitz, Dissertation 1997
- [016] Edelmann, Chr.:
Vakuumtechnik: Grundlagen und Anwendungen.
Hüthig Verlag GmbH, Heidelberg 1985

- [017] Göpel, W.; Ziegler, Ch.:
Einführung in die Materialwissenschaften: physikalisch-chemische Grundlagen und Anwendungen.
Teubner Verlagsgesellschaft Stuttgart, Leipzig 1996
- [018] Snaper, A.A.:
Arc deposition apparatus.
Patent, US 3,836,451 (1974)
- [019] Sablev, L.P.:
Apparatus for vacuum-evaporation of metals under the action of an electric arc.
Patent, US 3,783,231 (1974)
- [020] Dederichs, H.G.:
Segmentierte Katode für Lichtbogenbeschichtungsverfahren.
Patent, EP 0 489 396 (1992)
- [021] Tepman, A.:
Multiple edge deposition exclusion rings.
Patent, US 5,922,133 (1999)
- [022] Zimmer, O.; Siemroth, P.; Schülke, T; Vetter, J.:
Vacuum arc evaporation with a programmable erosion and deposition profile.
International Conference On Metallurgical Coatings And Thin Films, ICMCTF'97, San Diego, 1997
- [023] Zimmer, O.; Vetter, J.; Rackwitz, N.; Siemroth, P.:
Calculation and measurement of the time dependent erosion rate of electromagnetic steered rectangular arc cathodes.
Surface and Coatings Technology 146-147 (2001), S. 195 - 200
- [024] Yoshikawa, T.:
Method of controlling an arc spot in vacuum arc vapor deposition and an evaporation source.
Patent, EP 0 495 447 (1992)

- [025] Scheibe, H.-J.; Schultrich, B.; Drescher, D.:
Laser-induced vacuum arc (Laser Arc) and its application for deposition of hard amorphous carbon films.
Surface and Coatings Technology 74-75 (1995), S. 813 - 818
- [026] Scheibe, H.-J.; Schultrich, B.; Wilberg, R; Falz, M.:
Laser arc technology for industrial hard coating deposition.
Surface and Coatings Technology 97 (1997), S. 410 - 413
- [027] Siemroth, P.; Schülke, T.; Witke, T.:
High-current arc - a new source for high-rate deposition.
Surface and Coatings Technology 68-69 (1994), S. 314 - 319
- [028] Petereit, B.; Siemroth, P; Schneider, H.-H.; Hilgers, H.:
High current filtered arc deposition for ultra thin carbon overcoats on magnetic hard disks and read-write heads.
Surface and Coatings Technology 174-175 (2003), S. 648 - 650
- [029] Davydov, S.; Yotsombat, B.; Yu, L.D.; Pramukkul, P.; Charoennukul, R.; Vilaithong, T.:
Development of metal vapor vacuum arc ion source in Thailand.
Surface and Coatings Technology 131 (2000), S. 39 - 43
- [030] Engers, B; Fuchs, H.; Schultz, J.; Hettkamp, E.; Mecke, H.:
Comparison of substrate temperature and deposition rate between modified pulsed arc process and d.c. arc process.
Surface and Coatings Technology 133-134 (2000), S. 121 - 125
- [031] Keutel, K.; Hettkamp, E.:
Einfluss der Beschichtungsparameter des modifizierten Puls-Arc-Verfahrens auf das Beschichtungsplasma und die Schichteigenschaften.
AKF-Frühjahrstagung Dresden, 2003
- [032] Bruzzone, H.; Kelly, H.; Marquez, A.; Lamas, D.; Ansaldi, A.; Oviedo, C.:
TiN coatings generated with a pulsed plasma arc.
Plasma Sources Sci. Technol. 5 (1996), S. 582 - 587

- [033] Prengel, H.-G.:
PVD-Arc-Ion-Plating zur Herstellung von nitridischen Titan-Aluminium-Basis-Hartstoffschichten.
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 205, VDI-Verlag, Düsseldorf 1990
- [034] Steffens, H.-D.; Mack, M.; Möhwald, K.; Reichel, K.:
Reduction of droplet emission in random arc technology.
Surface and Coatings Technology, 46 (1991), p. 65 - 74
- [035] Reichel, K.:
Entwicklung und Charakterisierung von korrosions- und verschleißbeständigen Beschichtungen unter Einsatz des Arc-PVD-Verfahrens.
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 5 Nr. 246, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991
- [036] Schultrich, B.; Siemroth, P.; Vetter, J.; Zimmer, O.:
Neuere Entwicklungen auf dem Gebiet der Vakuumbogenbeschichtung.
Vakuum in Forschung und Praxis, 1 (1998), S. 37 - 46
- [037] Knotek, O.; Stöbel, C.; Krämer, G.:
Herstellung komplexer Hartstoffschichten unter Anwendung der random- und steered-Arc-Technik.
Dünnschichttechnologien - Vorträge zum Statusseminar 1992, S. 523 - 529
- [038] Steffens, H.-D.; Cronjäger, L.; Kopp, R.:
Weiterentwicklung des Ionenplattierens mit Arc-Verdampfern mit dem Ziel der Dropletverminderung bzw. -ausschaltung.
Dünnschichttechnologien - Vorträge zum Statusseminar 1990, S. 465 - 479
- [039] Boxman, R. L.; Goldsmith, S.; Shalev, S.; Yaloz, H.; Brosh, N.:
Fast deposition of metallurgical coatings and production of surface alloys using a pulsed high current vacuum arc.
Thin Solid Films, 139 (1986), p. 41 - 52

- [040] Siemroth, P.; Scheibe, H.-J.:
The Method of Laser-Sustained Arc Ignition.
IEEE Trans. Plasma Sci., 18 (1990), p. 911 - 916
- [041] Siemroth, P.; Schülke, Th.; Schultrich, B.:
High-Current Arc - A new Source for High Rate Deposition.
4th Int. Symp. on Trends and New Appl. in Thin Films TATF '94, Dresden
- [042] Tochitsky, E.I.; Gasenkova, I.V.; Milashevskaja, I.G.; Selifanov, O.V.;
Stankevich, E.V.:
The Use of Pulsed Vacuum Arc Deposition Method for Making Films of
Various Materials.
XVIIIth. ISDEIV Eindhoven 1998, Proceedings, S. 601 - 604
- [043] Witke, Th.; Siemroth, P.; Lunk, A.; Schülke, Th.:
„Spectroscopic Investigations of Plasma Process in PVD and ARC“
4 th Int. Symp. on Trends and New Appl. in Thin Films TATF '94;
Dresden, 7.-11.03.94
- [044] Sobolyev, O.:
Stromversorgungen und Prozessuntersuchungen beim Vakuumbogenbeschich-
tungsverfahren mit mehreren Verdampfern.
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation 2005
- [045] Zhitomirky, V.N.; Boxman, R.L.; Goldsmith, S.:
Unstable arc operation and cathode spot motion in a magnetically filtered
vacuum-arc deposition system.
J. Vac. Sci. Technol. 13 (1995) 4, S. 2233 - 2240
- [046] Sung-Yong Chun:
Influence of Bias voltage on the growth of films by hybrid plasma
implantation / deposition.
Surface & Coating Technology 193 (2005), S. 129 - 131

- [047] Lunev, V.M.; Ovcharenko, V.D., Kharoshikh, V.M.:
Plasma properties of a metal vacuum arc (I and II).
Sov. Phys. Techn. 22 (1977) 7, S. 855 ff.
- [048] Miller, H.C.; Kutzner, J.:
Ion flux from the cathode region of a vacuum arc.
Contributions Plasma Physic 31 (1991), S. 261 - 277
- [049] Fuchs, H.; Mecke, H.; Ellrodt, M.:
Distribution of ion current density in a modified pulse arc process as a
function of pulse parameters.
Surface and Coatings Technology 98 (1998), S.839 - 844
- [050] Rusteberg, C.; Lindmayer, M.; Jüttner, B.; Pursch, H.:
On the Ion Energy Distribution of High Current Arcs in Vacuum.
IEEE Transactions on Plasma Science, 23 (6) 1995, S.909 - 914
- [051] 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.
Surface & Coating Technology 142-144 (2001), S. 655 - 660
- [052] Yushkov, G.Y.; Oks, E.M.; Anders, A.; Brown, I.G.:
Effect of multiple current spikes on the enhancement of ion charge states of
vacuum arc plasmas.
J. Appl. Phys. 87 (12), 2000, S. 8345 - 8350
- [053] Bugaev, A.S.; Oks, E.M.; Yushkov, G.Y.; Anders, A.; Brown, I.G.:
Enhanced ion charge states in vacuum arc plasmas using a „current spike“
method.
Rev. of Scientific Instruments, 71 (2), 2000, S. 701 - 703
- [054] Hettkamp, E.; Fuchs, H.; Mecke, H.:
Ion current adapted control of the arc current in a pulsed cathodic arc
process.
Surface & Coating Technology 142-144 (2001), S. 655 - 660

-
- [055] Lyubimov, G.A.; Rakhovsky, V.I.:
The cathode spot of a vacuum arc.
Sov. Phys. Usp., 21: 693 - 718, 1978
- [056] Boxman, R.L.; Martin, P.J.; Sanders, D.M.:
Handbook of vacuum arc science and technology.
Noyes Publications, Park Ridge, (New Jersey), 1995
- [057] Kleberg, I.:
Die Dynamik von katodischen Brennflecken im externen Magnetfeld.
Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät I der Humboldt-Universität
Berlin, Dissertation 2001
- [058] Jüttner, B:
Cathode spots of electric arcs.
J. Phys. D: Appl. Phys. 34 (2001), R103 - R123
- [059] Robson, A.E.:
The motion of an arc in magnetic field.
Proceedings of IVth Int. Conference Phen. Ion Gases, IIB, 1959, S. 346 - 349
- [060] Jüttner, B.; Kleberg, I.:
The retrograde motion of arc cathode spots in vacuum.
J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000), S. 2025 - 2036
- [061] Care, C.M.:
Stochastic model for the random motion of a vacuum arc in the presence of
driving and confining fields.
J. Phys. D: Appl. Phys. 25 (1992), S. 1841 - 1843
- [062] Zimmer, O.; Vetter, J.; Rackwitz, N.; Siemroth, P.:
Calculation and measurement of the time dependent erosion rate of
elektromagnetic steered rectangular arc cathodes.
Surface & Coating Technology 146-147 (2001), S. 195 - 200

- [063] Anders, A.; Yushkov, G.Y.:
Ion flux from vacuum arc cathode spots in the absence and presence of a magnetic field.
J. Appl. Phys. 91 (8), 2002, S. 4824 - 4832
- [064] Anders, A.; Yushkov, G.Y.; Oks, E.; Nikolaev, A.; Brown, I.:
Ion charge distributions of pulsed vacuum arc plasmas in strong magnetic field.
Review of Scientific Instruments, Vol.69, Num. 3, 1998, S. 1332 - 1335
- [065] Kim, G.E.; Meunier, J.-L.; Ajersch, F.:
Experimental Study of the Effect of Nitrogen on Titanium-Arc Cathode Erosion.
IEEE Trans. Plasma Sci. 23 (1995) 6, S. 1001 - 1005
- [066] Münz, W.-D.; Schroeder, J.; Petersein, H.:
Einfluss von Beschichtungsverfahren und Beschichtungsparameter auf die Eigenschaften von TiN-Schichten.
Oberflächentechnik - Vorträge zum 5. SURTEC-Kongress 1989, S.61 - 76
- [067] Leopold, J.; Günther, H.; Leopold, R.:
„Qualitätskontrolle von Dünnschichtsystemen mittels Farbbildverarbeitung“
6. Workshop „Farbbildverarbeitung“, Berlin, 2000
- [068] Büschel, M.; Grimm, W.:
Influence of the pulsing of the current of a vacuum arc on rate and droplets.
Surface & Coating Technology 142-144 (2001), S. 665 - 668
- [069] Fuchs, H.; Mecke, H.:
Electrical arc parameters and spot behavior in a modified pulse arc process.
12th. Int. Conf. on Gas Discharges, Greifswald 1997, Proceedings

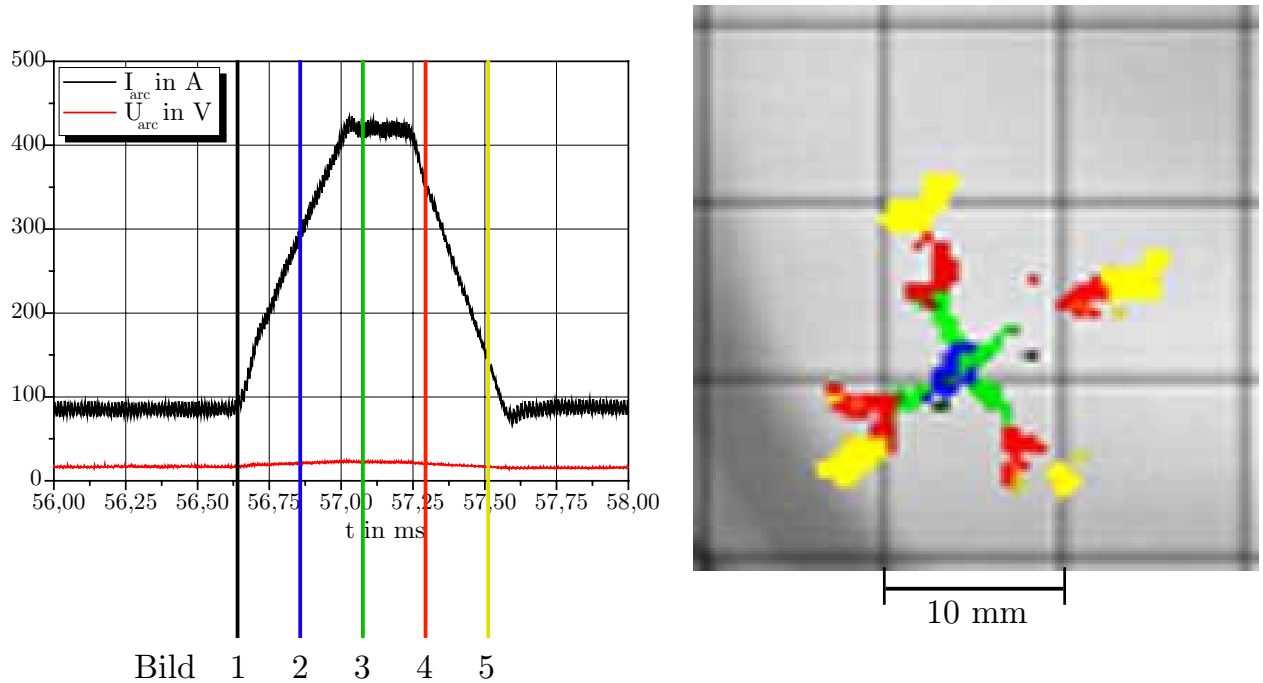
- [070] Ellrodt, M.; Kühn, M.:
Investigations of the cathode spot dynamics in a vacuum arc coating process.
Contrib. Plasma Phys. 36 (1996) 6, 687 - 696
- [071] Beilis, I.I.:
Mechanism for cathode spot grouping in vacuum arcs.
Applied Physics Letters, Vol. 81, Nr. 21, 2002, S. 3936 - 3938
- [072] Fuchs, H.:
Untersuchungen zur ionenstromangepassten Prozessführung und zu Verfahrensvarianten im gepulsten Vakuumbogen-Beschichtungsprozess.
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Dissertation 2004
- [073] Keutel, K.; Fuchs, H.; Edelmann, C.:
The influence of the operation parameters on the properties of thin films produced by a modified pulsed arc process.
Appl. Phys. A 78, 2004, S. 687 - 690
- [074] Devia, A.; Restrepo, E.; Arroyave, M.:
Optical spectroscopy of pulsed plasma used on titanium nitride coatings production.
Int. Congress on Plasma Physics, Pag, 1998, Proceedings
- [075] Anders, A.; Yushkov, G. Y.:
Angularly resolved measurements of ion energy of vacuum arc plasmas.
Applied Physics Letters, Vol. 80, Nr. 14, 2002, S. 2457 - 2459
- [076] Rossnagel, S.M.:
Thin film deposition with physical vapor deposition and related technologies.
J. Vac. Sci. Technol. A 21(5), 2003, S. 74 - 87
- [077] Ivanov, V.I.; Jüttner, B.; Pursch, H.:
Time-resolved measurements of the parameters of arc cathode plasmas in vacuum.
IEEE Trans. Plasma. Sci. 13 (1985) 5, S. 334 - 336

- [078] Fuchs, H.; Keutel, K.; Mecke, H.; Edelmann, Chr.:
Pulsed vacuum discharges on steered arc cathodes.
Surface & Coating Technology 116-119 (1999), S. 963 - 968
- [079] Barata, A.; Cunha, L.; Moura, C.:
Characterisation of chromium nitride films produced by PVD techniques.
Thin Solid Films, 398-399 (2001), p. 501 - 507
- [080] Hoy., R.; Sloof, W.G.; Janssen, G.C.A.M.:
Hard dense CrN_x coatings on three-dimensional objects.
Surface & Coating Technology 179 (2004), S. 215 - 222
- [081] Ahlgren, M.; Blomqvist, H.:
Influence of Bias variation on residual stress and texture in TiAlN PVD
coatings.
Surface & Coating Technology 200 (2005), S. 157 - 160
- [082] Vlasveld, A.C.; Harris, S.G.; Doyle, E.D.; Lewis, D.B.; Munz, W.D.:
Characterisation and performance of partially filtered arc TiAlN coatings.
Surface & Coating Technology 149 (2002), S. 217 - 224
- [083] Gorokhovskiy, V.I.; Deepak, G.B.; Shivpuri, R.; Kulkarni, K.; Bhattacharya;
R.; Rai, A.K.:
Characterisation of large area filtered arc deposition technology: part II -
coating properties and applications.
Surface & Coating Technology 140 (2001), S. 215 - 224
- [084] Werner, Z.; Stanislawski, J.; Piekoszewski, J.; Levashov, E.A.; Szymczyk, W.:
New types of multi-component hard coatings deposited by ARC PVD on
steel pre-treated by pulsed plasma beams.
Vacuum 70 (2003), S. 263 - 267
- [085] Scheibe, H.J.; Schultrich, B.; Ziegele, H.; Siemroth, P:
Deposition of superhard amorphous carbon films by pulsed arc sources.
IEEE Trans. Plasma Science, Vol. 25, No. 4, (1997), S. 685 - 688

- [086] Huang, M.; Lin, G.; Zhao, Y.; Sun, Ch.; Wen, L.; Dong, Ch.:
Macro-particle reduction mechanism in Biased arc ion plating of TiN.
Surface & Coating Technology 176 (2003), S. 109 - 114
- [087] Burgmer, W.; Heuvel, H.-J.; Dederichs, H.-G.:
Herstellung von Schichten durch die Arc-Technik mit segmentierten Katoden.
Forschungsprojekt, RWTH Aachen, FKZ 13 N 5604 1, 1992
- [088] Siemroth, P.; Zimmer, O.; Schülke, Th.; Vetter, J.:
Vacuum arc evaporation with programable erosion and deposition profile.
Surface & Coating Technology 94-95 (1997), S. 592 - 596
- [089] Zimmer, O.; Vetter, J.; Rackwitz, N.; Siemroth, P.:
Calculation and measurement of the time dependent erosion rate of electro-
magnetic steered rectangular arc cathodes.
Surface & Coating Technology 146-147 (2001), S. 195 - 200
- [090] Walke, P.J.; New, R.; Care, C.M.:
The distribution of transit times in a magnetically steered cathodic arc.
Surface & Coating Technology 68/69 (1994), S. 352 - 358
- [091] Walke, P.J.; New, R.; Care, C.M.:
Behaviour of a steered cathodic arc as a function of steering magnetic field.
Surface & Coating Technology 59 (1993), S. 126 - 128
- [092] Ives, M.; Brooks, J.S.; Cawley, J.:
Fundamental studies of the steered arc technique.
Surface & Coating Technology 49 (1991), S. 244 - 252
- [093] Creasey, S.; Lewis, D.B.; Smith, I.J.; Münz, W.-D.:
SEM image analysis of droplet formation during metal ion etching by a
steered arc discharge.
Surface & Coating Technology 97 (1997), S. 163 - 175

Abbildungen

a) Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren auf Titan-Target



b) Verfahrenskombination (Permanentmagnet) auf Titan-Target

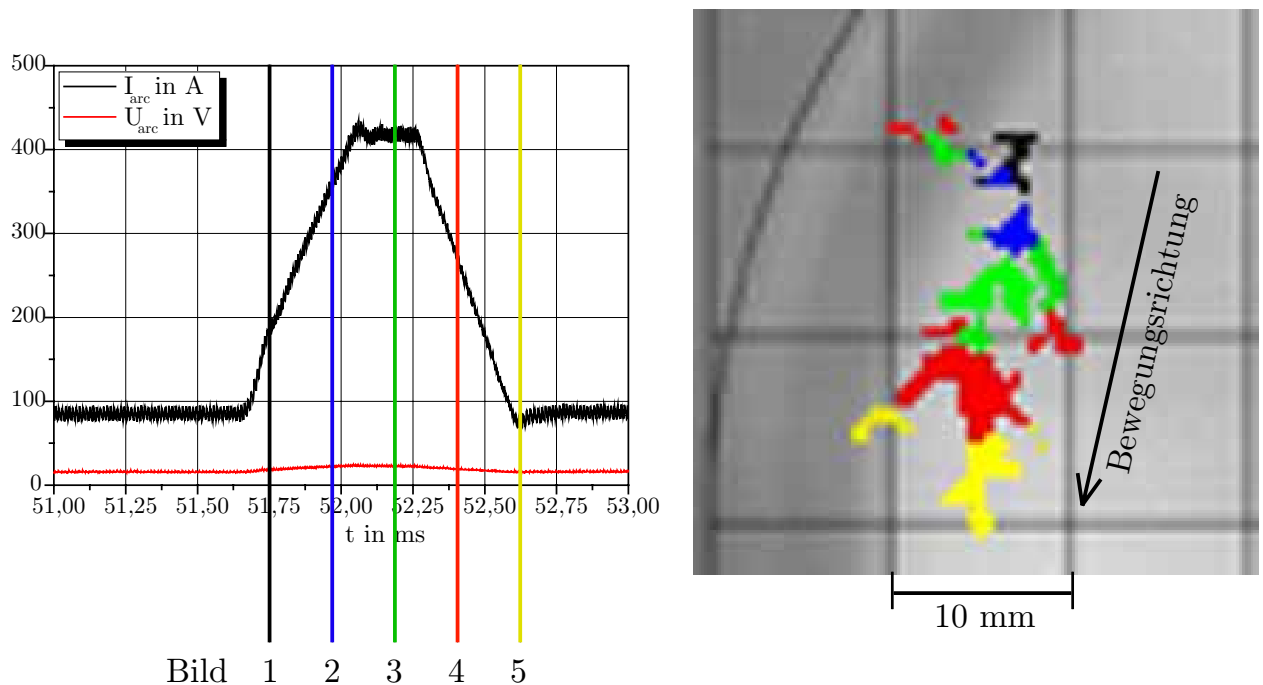
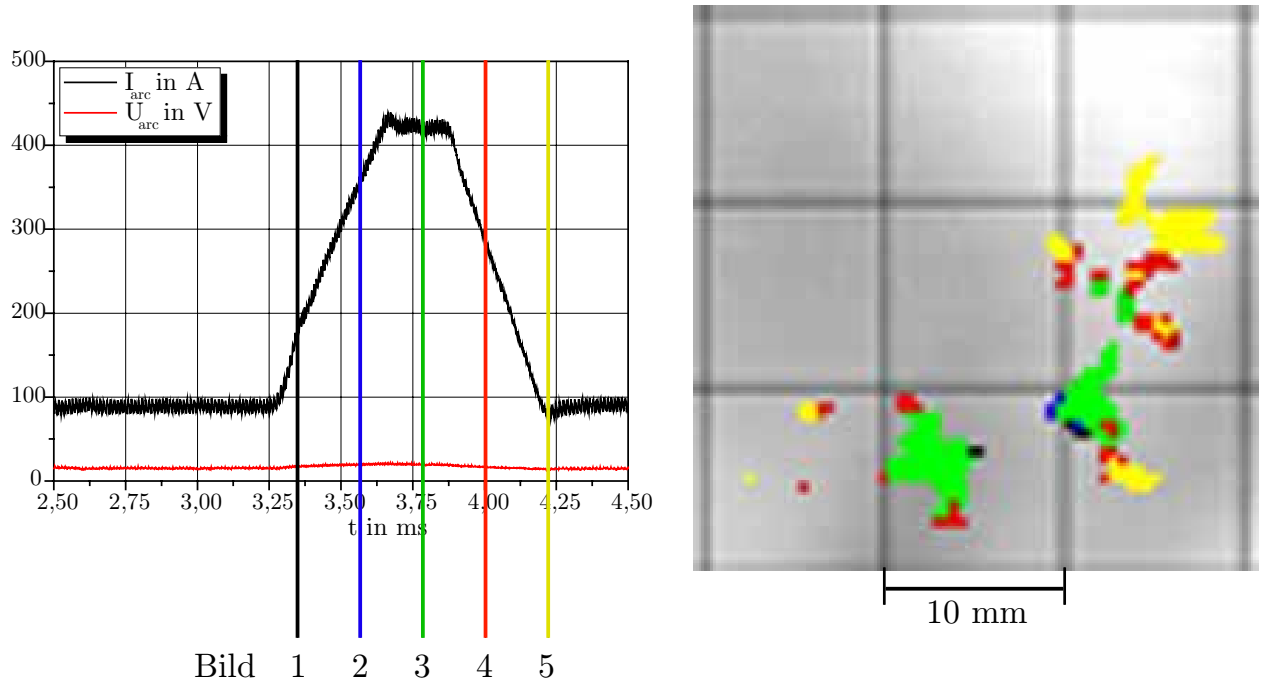


Abb. A1 Vergleich der Fußpunktbewegung während der Impulsphase (Titan-Target; $p = 1 \text{ Pa}$, N_p ; $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $f_p = 200 \text{ Hz}$; $t_p = 0,7 \text{ ms}$)

a) Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren auf Titan-Aluminium-Target



b) Verfahrenskombination (Permanentmagnet) auf Titan-Aluminium-Target

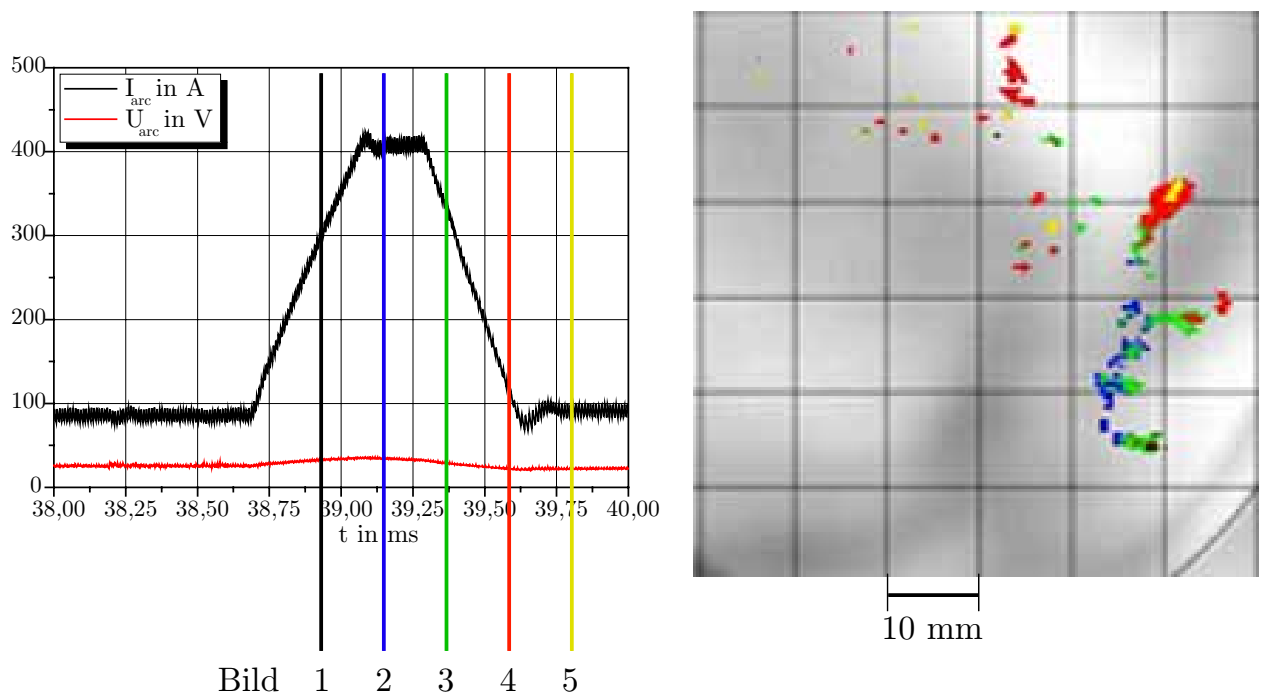
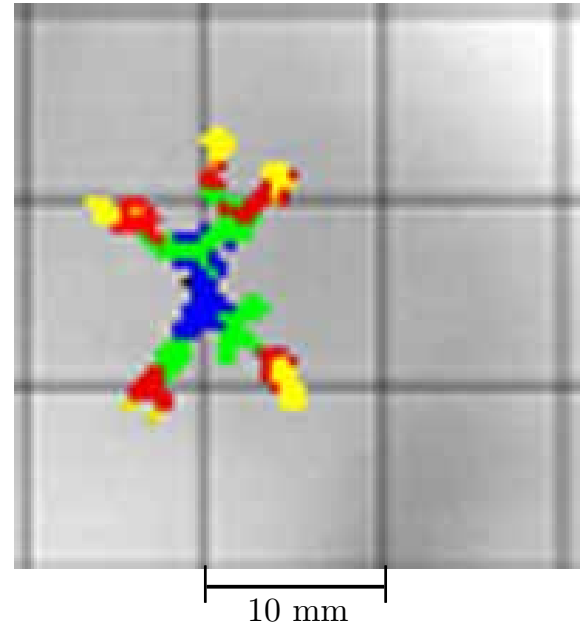
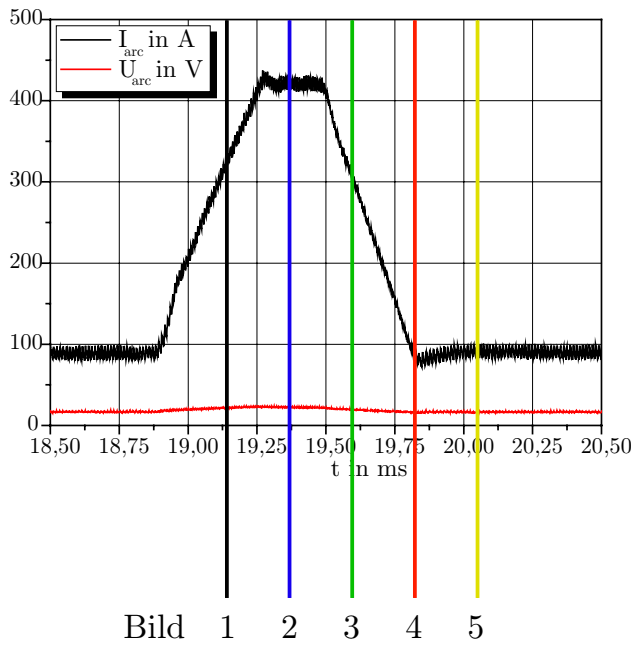


Abb. A2 Vergleich der Fußpunktbewegung während der Impulsphase (Titan-Aluminium-Target; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $f_P = 200 \text{ Hz}$; $t_P = 0,7 \text{ ms}$)

a) Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren auf Chrom-Target



b) Verfahrenskombination (Permanentmagnet) auf Chrom-Target

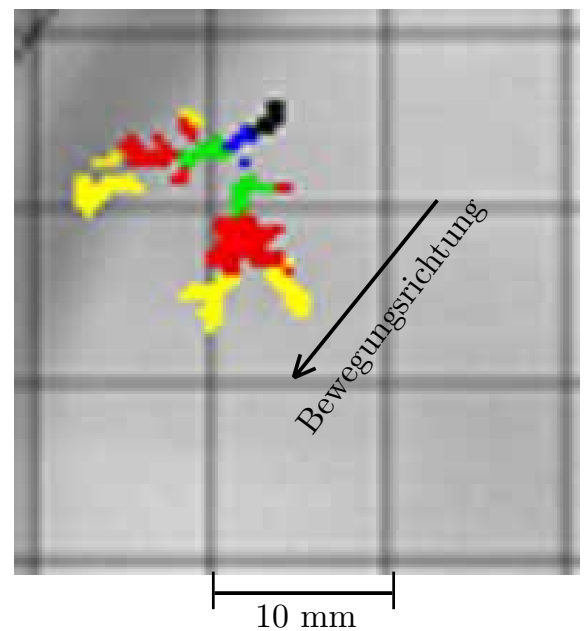
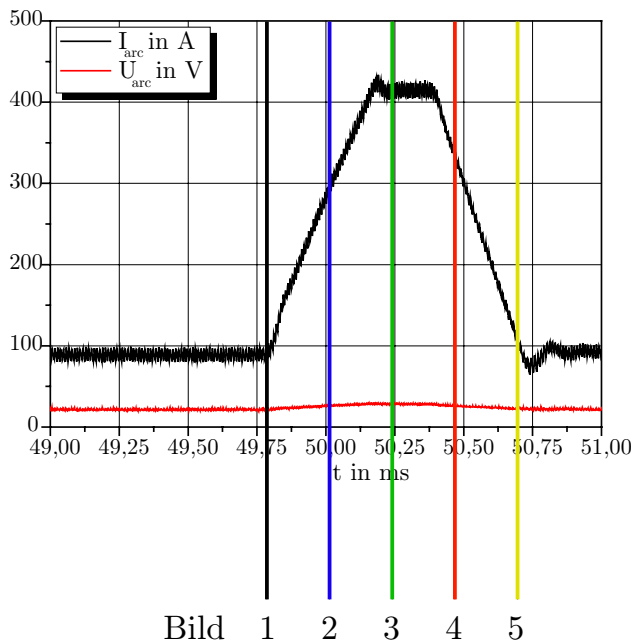


Abb. A3 Vergleich der Fußpunktbeugung während der Impulsphase (Chrom-Target; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $f_P = 200 \text{ Hz}$; $t_P = 0,7 \text{ ms}$)

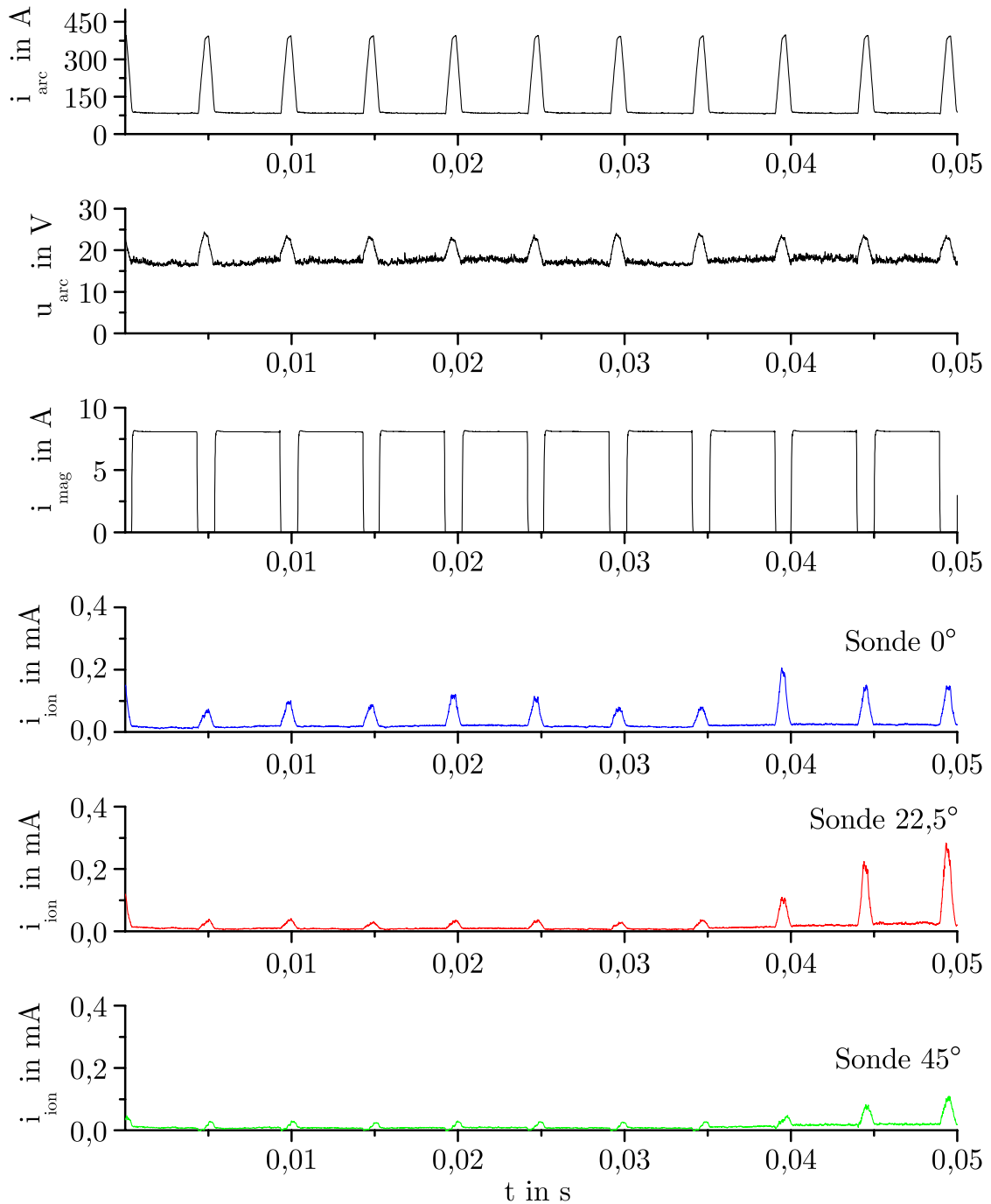


Abb. A4 *Beispiel eines Zeitverlaufes der zur Ionenstromerfassung notwendigen elektrischen Messwerte bei einem modifiziertem Puls-Arc-Prozess (Titan-Target; $I_G = 80$ A; $I_P = 400$ A; $f_P = 200$ Hz; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100$ V; $I_{\text{mag}} = 8$ A; $p = 1$ Pa, N_2)*

Anmerkung: Die unterschiedlichen Höhen des Ionenstromverlaufes ergeben sich durch die Bewegung der Fußpunkte auf der Targetoberfläche und der daraus resultierenden unterschiedlichen Abstände der Fußpunkte zu den Sonden (vor allem Sonde $22,5^\circ$ und 45°).

Tabellen

Tab. A1 Gemessene mittlere Fußpunktgeschwindigkeiten ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

	f_p [Hz]	t_p [ms]	I_G [A]	I_p [A]	mittlere Geschwin- digkeit (Titan) [m/s]	mittlere Geschwin- digkeit (Titan- Aluminium) [m/s]	mittlere Geschwin- digkeit (Chrom) [m/s]
Random Arc	-	-	80	-	7,6	6,4	4,1
	-	-	100	-	8,7	6,2	5,2
	-	-	120	-	7,7	5,4	7,2
	-	-	140	-	9,7	5,7	8,0
Steered Arc	-	-	80	-	17,9	20,8	11,3
	-	-	100	-	19,5	17,0	14,8
	-	-	120	-	22,0	29,1	16,3
	-	-	140	-	22,5	26,0	12,2
Modifiziertes Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	10,3	9,1	9,4
	200	0,6	80	400	11,1	10,0	12,2
	200	0,7	80	400	17,6	19,0	11,8
	200	0,8	80	400	15,5	22,0	10,6
	80	0,8	80	400	16,4	14,1	14,2
	80	0,8	80	500	20,6	18,5	11,0
	80	0,8	80	600	16,0	17,0	11,9
	80	0,8	80	700	18,7	18,1	14,1
Verfahrens- kombination	200	0,5	80	400	19,6	33,9	16,0
	200	0,6	80	400	19,2	45,2	13,1
	200	0,7	80	400	22,5	-	13,5
	200	0,8	80	400	24,2	-	15,2
	80	0,8	80	400	24,3	73,3	14,5
	80	0,8	80	500	22,9	28,6	14,1
	80	0,8	80	600	18,2	-	15,5
	80	0,8	80	700	22,5	-	17,3

Tab. A2 Beispiel von Mittelwerten des Ionenstromes für die einzelnen Prozesse und Kombinationen bei $I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$ (Puls: $I_G = 80 \text{ A}$; $I_p = 400 \text{ A}$; $t_p = 0,7 \text{ ms}$; $f_p = 200 \text{ Hz}$; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; Abstand Target - Sonde: 140 mm)

	$I_{\text{ionMW}} / I_{\text{arcMW}}$ in [mA/A]				Mod. Puls- Arc- Verfahren bezogen auf Random- Arc in [%]	Steered- Arc bezogen auf Random- Arc in [%]	Verfahrens- kombination bezogen auf Random-Arc in [%]
TiN							
Sonde	Random Arc	Steered Arc	Mod. Puls- Arc	Verfahrens- kombi- nation			
0°	0,281	0,188	0,411	0,187	51,7	-30,7	-0,6
22,5°	0,172	0,146	0,256	0,148	49,5	-15,1	1,8
45°	0,153	0,154	0,163	0,171	6,6	0,6	11,2
TiAlN							
Sonde	Random Arc	Steered Arc	Mod. Puls- Arc	Verfahrens- kombi- nation			
0°	0,237	0,149	0,326	0,138	37,6	-37,1	-7,6
22,5°	0,145	0,138	0,179	0,136	23,6	-4,9	-1,3
45°	0,135	0,123	0,132	0,144	-2,8	-9,1	17,4
CrN							
Sonde	Random Arc	Steered Arc	Mod. Puls- Arc	Verfahrens- kombi- nation			
0°	0,401	0,191	0,693	0,172	72,8	-52,5	-9,9
22,5°	0,328	0,182	0,527	0,174	60,7	-44,4	-4,7
45°	0,184	0,141	0,215	0,143	16,7	-23,3	1,0

Tab. A3 Beispiel von Maximalwerten des Ionenstromes für die einzelnen Prozesse und Kombinationen bei $I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$ (Puls: $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $t_p = 0,7 \text{ ms}$; $f_p = 200 \text{ Hz}$; $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; Abstand Target - Sonde: 140 mm)

	$I_{\text{ionmax}} / I_{\text{arcmax}}$ in [mA/A]				Mod. Puls- Arc- Verfahren bezogen auf Random- Arc in [%]	Steered- Arc bezogen auf Random- Arc in [%]	Verfahrens- kombination bezogen auf Random-Arc in [%]
TiN							
Sonde	Random Arc	Steered Arc	Mod. Puls- Arc	Verfahrens kombi- nation			
0°	0,717	0,532	1,974	0,339	175,2	-25,8	-36,3
22,5°	0,694	1,090	0,977	0,977	103,3	57,1	-10,3
45°	0,409	0,963	1,948	1,948	-10,0	135,5	102,2
TiAlN							
	Random Arc	Steered Arc	Mod. Puls- Arc	Verfahrens kombi- nation			
0°	1,072	0,368	2,024	0,450	88,8	-65,6	22,2
22,5°	0,394	0,391	1,422	0,682	261,3	-0,7	74,5
45°	0,299	1,106	0,377	1,952	26,0	269,8	76,4
CrN							
Sonde	Random Arc	Steered Arc	Mod. Puls- Arc	Verfahrens kombi- nation			
0°	0,946	0,369	2,008	0,685	112,4	-60,9	85,6
22,5°	0,765	0,477	1,929	1,626	152,2	-37,6	240,6
45°	0,479	1,359	0,372	1,886	-22,2	184,0	38,7

Tab. A4 Beispiel von Mittelwerten des Ionenpulsstromes für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren ohne und mit Magnetfeldeinwirkung bei $I_{\text{arcMW}} = 120 \text{ A}$
 (Puls: $I_G = 80 \text{ A}$; $I_P = 400 \text{ A}$; $t_P = 0,7 \text{ ms}$; $f_P = 200 \text{ Hz}$;
 $U_{\text{Bias}} = U_{\text{Sonde}} = -100 \text{ V}$; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; Abstand Target - Sonde: 140 mm)

	$I_{\text{ionpulsMW}} / I_{\text{arepulsMW}}$ in [mA/A]		
	Mod. Puls-Arc- Verfahren	Kombination Steered- Arc und Mod. Puls-Arc- Verfahren	Vergleich in [%]
TiN			
Sonde 0°	1,311	0,307	-76,6
Sonde $22,5^\circ$	1,095	0,603	-44,9
Sonde 45°	0,361	0,791	119,5
TiAlN			
Sonde 0°	1,602	0,190	-88,1
Sonde $22,5^\circ$	1,098	0,336	-69,4
Sonde 45°	0,282	0,610	116,2
CrN			
Sonde 0°	1,580	0,490	-69,0
Sonde $22,5^\circ$	1,406	0,832	-40,8
Sonde 45°	0,351	1,289	267,4

Tab. A5 Schichtdicke, Massenerosionskoeffizient und Beschichtungsrate für Random-Arc und modifiziertes Puls-Arc-Verfahren ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $t_{\text{Besch}} = 20 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 280 mm)

		f_p	t_p	I_G	I_p	I_{eff}	I_{avg}	Schichtdicke d_s	Massenerosionskoeffizient μ	Beschichtungsrate $\dot{d}_s/I_{\text{arcMW}}$
		Hz	ms	A	A	A	A	μm	$10^{-4} \text{ g}/(\text{A}\cdot\text{s})$	$\mu\text{m}/(\text{A}\cdot\text{h})$
Titan	Random Arc	-	-	80	-	86,0	85,8	1,52	0,160	0,053
		-	-	100	-	104,4	104,2	1,83	0,165	0,053
		-	-	120	-	125,2	125,1	2,24	0,165	0,054
		-	-	140	-	151,1	151,0	2,77	0,158	0,055
	Mod. Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	124,1	105,0	1,81	0,165	0,052
		200	0,6	80	400	145,1	117,1	2,04	0,176	0,052
		200	0,7	80	400	153,1	121,4	2,56	0,176	0,063
		200	0,8	80	400	165,0	129,2	2,95	0,173	0,069
		80	0,8	80	400	121,0	100,8	2,64	0,168	0,079
		80	0,8	80	500	132,7	104,1	2,28	0,181	0,066
		80	0,8	80	600	133,1	102,7	1,91	0,171	0,056
		80	0,8	80	700	133,9	101,2	1,90	0,172	0,056
Titan-Aluminium	Random Arc	-	-	80	-	81,2	81,0	3,49	0,147	0,129
		-	-	100	-	101,4	101,3	3,64	0,139	0,108
		-	-	120	-	119,0	118,9	3,60	0,147	0,091
		-	-	140	-	143,1	143,0	3,77	0,142	0,079
	Mod. Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	111,6	91,2	5,00	0,170	0,165
		200	0,6	80	400	141,0	114,1	5,33	0,169	0,140
		200	0,7	80	400	148,9	118,7	5,33	0,166	0,135
		200	0,8	80	400	156,4	121,7	6,04	0,167	0,149
		80	0,8	80	400	116,9	96,5	4,03	0,167	0,125
		80	0,8	80	500	133,2	105,1	3,99	0,153	0,114
		80	0,8	80	600	130,9	101,6	4,18	0,158	0,123
		80	0,8	80	700	130,8	101,2	4,17	0,151	0,124
Chrom	Random Arc	-	-	80	-	84,8	84,7	1,50	0,213	0,053
		-	-	100	-	103,1	102,9	1,91	0,223	0,056
		-	-	120	-	122,8	122,7	2,41	0,230	0,059
		-	-	140	-	142,5	142,5	2,65	0,225	0,056
	Mod. Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	118,0	100,2	3,09	0,229	0,092
		200	0,6	80	400	139,4	113,3	3,74	0,233	0,099
		200	0,7	80	400	147,7	118,0	4,43	0,227	0,113
		200	0,8	80	400	159,1	125,2	5,24	0,239	0,126
		80	0,8	80	400	117,6	97,7	2,97	0,224	0,091
		80	0,8	80	500	130,9	102,7	3,57	0,222	0,104
		80	0,8	80	600	130,5	101,3	3,60	0,227	0,107
		80	0,8	80	700	129,4	100,2	3,47	0,234	0,104

Tab. A6 Schichtdicke, Massenerosionskoeffizient und Beschichtungsrate für Steered-Arc und Kombination von Steered-Arc mit dem modifizierten Puls-Arc-Verfahren ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; Beschichtungszeit: 20 min; Abstand Target - Substrat: 280 mm)

		f_p	t_p	I_G	I_p	I_{eff}	I_{avg}	Schicht- dicke d_s	Massenerosions- koeffizient μ	Beschichtungs- rate $\dot{d}_s/I_{\text{arcMW}}$
		Hz	ms	A	A	A	A	μm	$10^{-4} \text{ g}/(\text{A}\cdot\text{s})$	$\mu\text{m}/(\text{A}\cdot\text{h})$
Titan	Steered-Arc	-	-	80	-	82,5	82,4	1,26	0,094	0,046
		-	-	100	-	102,4	102,3	1,53	0,122	0,045
		-	-	120	-	121,4	121,4	1,74	0,116	0,043
		-	-	140	-	143,0	142,9	1,94	0,131	0,041
	Verfahrens- kombination	200	0,5	80	400	118,7	100,2	1,48	0,126	0,044
		200	0,6	80	400	141,1	113,4	1,91	0,111	0,050
		200	0,7	80	400	148,6	117,4	1,92	0,130	0,049
		200	0,8	80	400	161,8	126,9	2,10	0,131	0,050
		80	0,8	80	400	118,4	97,3	1,57	0,122	0,049
		80	0,8	80	500	131,2	101,5	1,81	0,103	0,053
		80	0,8	80	600	133,0	102,8	1,64	0,124	0,048
		80	0,8	80	700	132,2	101,9	1,72	0,105	0,051
Titan-Aluminium	Steered-Arc	-	-	80	-	82,7	82,6	1,48	0,099	0,054
		-	-	100	-	103,4	103,3	1,51	0,118	0,044
		-	-	120	-	122,9	122,8	2,64	0,110	0,064
		-	-	140	-	142,9	142,8	2,28	0,117	0,048
	Verfahrens- kombination	200	0,5	80	400	119,2	100,0	1,83	0,116	0,055
		200	0,6	80	400	142,1	114,3	1,84	0,120	0,048
		200	0,7	80	400	148,5	117,1	2,05	0,098	0,052
		200	0,8	80	400	160,4	124,8	2,14	0,135	0,051
		80	0,8	80	400	121,0	100,5	1,68	0,130	0,050
		80	0,8	80	500	133,8	104,5	1,72	0,093	0,049
		80	0,8	80	600	130,7	99,9	1,57	0,137	0,047
		80	0,8	80	700	130,4	99,1	1,77	0,092	0,054

Tab. A7 Messungen zu Härte (H) und Reduced Modulus (Er) für Steered-Arc und Kombination von Steered-Arc mit dem modifiziertes Puls-Arc-Verfahren im Vergleich zum Random-Arc und modifiziertem Puls-Arc-Verfahren ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $t_{\text{Besch}} = 20 \text{ min}$; Abstand Target-Substrat: 280 mm)

						ohne Magnetfeld		mit Magnetfeld		Vergleich	
		f_p	t_p	I_G	I_p	H	Er	H	Er	H	Er
		Hz	ms	A	A	GPa	GPa	GPa	GPa	%	%
Titan	Random Arc	-	-	80	-	11,24	215,69	20,64	246,10	83,6	14,1
		-	-	100	-	20,10	251,11	21,06	252,69	4,8	0,6
		-	-	120	-	20,12	262,64	19,90	288,13	-1,1	9,7
		-	-	140	-	24,49	283,07	24,24	290,45	-1,0	2,6
	Mod. Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	24,85	271,58	18,42	274,04	-25,9	0,9
		200	0,6	80	400	22,64	287,71	20,41	262,72	-9,8	-8,7
		200	0,7	80	400	23,90	289,91	20,85	282,09	-12,8	-2,7
		200	0,8	80	400	24,86	282,74	21,15	282,24	-14,9	-0,2
		80	0,8	80	400	22,64	296,22	19,33	251,91	-14,6	-15,0
		80	0,8	80	500	28,55	307,74	20,28	258,14	-29,0	-16,1
		80	0,8	80	600	23,90	308,15	19,16	253,21	-19,9	-17,8
		80	0,8	80	700	25,50	297,41	20,38	261,58	-20,1	-12,0
Titan-Aluminium	Random Arc	-	-	80	-	21,63	347,70	22,17	300,22	2,5	-13,7
		-	-	100	-	14,07	235,08	9,91	226,75	-29,6	-3,5
		-	-	120	-	19,25	300,95	17,01	278,48	-11,7	-7,5
		-	-	140	-	7,72	102,78	20,13	264,79	160,7	157,6
	Mod. Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	11,57	272,08	14,81	231,84	28,0	-14,8
		200	0,6	80	400	10,98	227,10	27,15	292,64	147,3	28,9
		200	0,7	80	400	17,35	256,69	17,62	227,57	1,6	-11,3
		200	0,8	80	400	19,81	292,56	26,42	311,11	33,3	6,3
		80	0,8	80	400	26,22	289,68	22,62	287,26	-13,7	-0,8
		80	0,8	80	500	12,63	224,66	33,89	256,45	168,3	14,1
		80	0,8	80	600	12,85	211,41	22,78	273,88	77,3	29,5
		80	0,8	80	700	25,63	277,78	26,64	270,23	4,0	-2,7
Chrom	Random Arc	-	-	80	-	16,24	213,73	21,03	264,74	29,5	23,9
		-	-	100	-	19,50	247,27	25,64	280,69	31,5	13,5
		-	-	120	-	17,50	253,24	17,61	327,21	0,6	29,2
		-	-	140	-	18,51	253,54	20,72	320,18	12,0	26,3
	Mod. Puls-Arc-Verfahren	200	0,5	80	400	20,56	253,13	22,20	277,47	8,0	9,6
		200	0,6	80	400	8,50	189,05	22,73	279,54	167,5	47,9
		200	0,7	80	400	17,89	267,04	19,70	310,07	10,2	16,1
		200	0,8	80	400	19,37	273,39	18,50	289,21	-4,5	5,8
		80	0,8	80	400	19,54	244,90	22,55	283,85	15,5	15,9
		80	0,8	80	500	21,04	263,08	21,06	289,05	0,1	9,9
		80	0,8	80	600	17,04	252,91	17,68	281,77	3,8	11,4
		80	0,8	80	700	21,75	270,74	18,58	306,23	-14,6	13,1

Tab. A9-1 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase für das Ti-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle								
f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	S_{puls}
Hz	ms	A	A	A	m/s		m/s	mm
-	-	80	-	0	-	kein Kreis	-	-
-	-	80	-	2	4,13	Kreisbahn sehr schwer erkennbar	-	-
-	-	80	-	4	4,10	Kreisbahn schwer erkennbar	-	-
-	-	80	-	6	7,27	Kreisbahn schwer erkennbar	-	-
-	-	80	-	8	7,60	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
-	-	120	-	0	-	kein Kreis	-	-
-	-	120	-	2	4,94	Kreisbahn sehr schwer erkennbar	-	-
-	-	120	-	4	6,60	Kreisbahn schwer erkennbar	-	-
-	-	120	-	6	8,30	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
-	-	120	-	8	10,69	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
200	0,5	80	400	0	-	kein Kreis	13,91	17,9
200	0,5	80	400	2	2,74	Kreisbahn schwer erkennbar	14,82	17,9
200	0,5	80	400	4	4,22	Kreisbahn schwer erkennbar	16,33	16,9
200	0,5	80	400	6	5,47	Kreisbahn gut erkennbar	15,96	17,1
200	0,5	80	400	8	6,26	Kreisbahn gut erkennbar	16,33	17,7
200	0,6	80	400	0	-	kein Kreis	13,13	23,0
200	0,6	80	400	2	4,56	Kreisbahn schwer erkennbar	13,61	23,0
200	0,6	80	400	4	5,70	Kreisbahn schwer erkennbar	14,67	23,2
200	0,6	80	400	6	8,96	Kreisbahn gut erkennbar	15,50	21,4
200	0,6	80	400	8	9,88	Kreisbahn gut erkennbar	16,94	23,0
200	0,7	80	400	0	-	kein Kreis	14,74	24,2
200	0,7	80	400	2	3,40	Kreisbahn schwer erkennbar	15,27	24,4
200	0,7	80	400	4	4,80	Kreisbahn schwer erkennbar	15,58	22,0
200	0,7	80	400	6	5,07	Kreisbahn gut erkennbar	16,71	22,0
200	0,7	80	400	8	6,08	Kreisbahn gut erkennbar	16,56	21,8
200	0,8	80	400	0	-	kein Kreis	14,52	27,0
200	0,8	80	400	2	-	Kreisbahn schwer erkennbar	15,88	26,8
200	0,8	80	400	4	4,34	Kreisbahn schwer erkennbar	16,33	25,4
200	0,8	80	400	6	5,13	Kreisbahn gut erkennbar	15,20	24,0
200	0,8	80	400	8	8,33	Kreisbahn gut erkennbar	16,56	23,8

Tab. A9-2 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase für das Ti-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle								
f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	S_{puls}
Hz	ms	A	A	A	m/s		m/s	mm
80	0,8	80	400	0	-	kein Kreis	18,83	28,6
80	0,8	80	400	2	3,87	Kreisbahn schwer erkennbar	18,37	29,4
80	0,8	80	400	4	4,99	Kreisbahn gut erkennbar	16,56	27,2
80	0,8	80	400	6	7,54	Kreisbahn gut erkennbar	16,79	26,4
80	0,8	80	400	8	9,12	Kreisbahn gut erkennbar	17,42	27,6
80	0,8	80	500	0	-	kein Kreis	16,83	32,1
80	0,8	80	500	2	4,20	Kreisbahn schwer erkennbar	17,69	29,8
80	0,8	80	500	4	4,12	Kreisbahn schwer erkennbar	17,28	29,4
80	0,8	80	500	6	5,91	Kreisbahn sehr schwer erkennbar	19,28	30,2
80	0,8	80	500	8	5,70	Kreisbahn gut erkennbar	19,96	31,9
80	0,8	80	600	0	-	kein Kreis	17,24	30,6
80	0,8	80	600	2	4,17	Kreisbahn schwer erkennbar	18,37	30,6
80	0,8	80	600	4	6,18	Kreisbahn schwer erkennbar	17,01	28,0
80	0,8	80	600	6	6,27	Kreisbahn gut erkennbar	18,37	27,6
80	0,8	80	600	8	4,07	Kreisbahn gut erkennbar	19,73	29,0

Tab. A10-1 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstromphase für das Cr-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle								
f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	S_{puls}
Hz	ms	A	A	A	m/s		m/s	mm
-	-	80	-	0	0	kein Kreis	-	-
-	-	80	-	2	2,57	Kreisbahn schwer erkennbar	-	-
-	-	80	-	4	3,06	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
-	-	80	-	6	4,28	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
-	-	80	-	8	4,81	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
-	-	120	-	0	-	kein Kreis	-	-
-	-	120	-	2	-	kein Kreis erkennbar	-	-
-	-	120	-	4	5,02	Kreisbahn schwer erkennbar	-	-
-	-	120	-	6	4,96	Kreisbahn schwer erkennbar	-	-
-	-	120	-	8	5,45	Kreisbahn gut erkennbar	-	-

Tab. A10-2 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase für das Cr-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle								
f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	S_{puls}
Hz	ms	A	A	A	m/s		m/s	mm
200	0,5	80	400	0	-	kein Kreis	9,60	13,9
200	0,5	80	400	2	-	kein Kreis erkennbar	9,30	12,5
200	0,5	80	400	4	2,61	Kreisbahn gut erkennbar	9,91	12,9
200	0,5	80	400	6	3,87	Kreisbahn gut erkennbar	10,96	12,7
200	0,5	80	400	8	4,47	Kreisbahn gut erkennbar	10,28	12,3
200	0,6	80	400	0	-	kein Kreis	10,36	16,1
200	0,6	80	400	2	4,05	Kreisbahn gut erkennbar	9,53	15,5
200	0,6	80	400	4	3,56	Kreisbahn gut erkennbar	10,28	16,1
200	0,6	80	400	6	4,15	Kreisbahn gut erkennbar	9,98	16,1
200	0,6	80	400	8	5,09	Kreisbahn gut erkennbar	10,89	15,3
200	0,7	80	400	0	-	kein Kreis	9,53	16,3
200	0,7	80	400	2	3,49	Kreisbahn gut erkennbar	10,21	17,9
200	0,7	80	400	4	3,80	Kreisbahn gut erkennbar	10,43	16,3
200	0,7	80	400	6	4,15	Kreisbahn gut erkennbar	10,89	16,7
200	0,7	80	400	8	5,38	Kreisbahn gut erkennbar	12,02	17,1
200	0,8	80	400	0	-	kein Kreis	12,02	18,5
200	0,8	80	400	2	3,48	Kreisbahn gut erkennbar	12,25	18,8
200	0,8	80	400	4	3,33	Kreisbahn gut erkennbar	11,34	17,9
200	0,8	80	400	6	4,41	Kreisbahn gut erkennbar	11,80	17,5
200	0,8	80	400	8	5,07	Kreisbahn gut erkennbar	12,70	19,0
80	0,8	80	400	0	-	kein Kreis	10,66	19,2
80	0,8	80	400	2	2,42	Kreisbahn gut erkennbar	11,12	18,8
80	0,8	80	400	4	3,80	Kreisbahn gut erkennbar	11,80	19,2
80	0,8	80	400	6	5,65	Kreisbahn gut erkennbar	11,84	19,0
80	0,8	80	400	8	4,41	Kreisbahn gut erkennbar	11,16	18,8
80	0,8	80	500	0	-	kein Kreis	11,43	21,2
80	0,8	80	500	2	2,60	Kreisbahn gut erkennbar	12,25	20,6
80	0,8	80	500	4	3,70	Kreisbahn gut erkennbar	12,70	20,2
80	0,8	80	500	6	4,09	Kreisbahn gut erkennbar	12,29	20,0
80	0,8	80	500	8	3,58	Kreisbahn gut erkennbar	11,84	19,8
80	0,8	80	600	0	-	kein Kreis	10,98	20,0
80	0,8	80	600	2	3,38	Kreisbahn gut erkennbar	11,34	19,2
80	0,8	80	600	4	3,07	Kreisbahn gut erkennbar	12,48	19,4
80	0,8	80	600	6	4,07	Kreisbahn gut erkennbar	12,48	19,0
80	0,8	80	600	8	4,56	Kreisbahn gut erkennbar	11,57	18,8

Tab. A11-1 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase für das TiAl-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle								
f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	S_{puls}
Hz	ms	A	A	A	m/s		m/s	mm
-	-	80	-	0	-	kein Kreis	-	-
-	-	80	-	2	-	kein Kreis	-	-
-	-	80	-	4	-	Fußpunkt springt, kein Kreis	-	-
-	-	80	-	6	4,20	Kreisbahn erkennbar	-	-
-	-	80	-	8	9,14	Kreisbahn gut erkennbar	-	-
-	-	120	-	0	-	kein Kreis	-	-
-	-	120	-	2	-	keine stabile Kreisbahn erkennbar	-	-
-	-	120	-	4	-	Fußpunkt springt, kein Kreis erkennbar	-	-
-	-	120	-	6	8,36	Fußpunkt springt, Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	-	-
-	-	120	-	8	12,83	Fußpunkt springt, Kreisbahn erkennbar	-	-
200	0,5	80	400	0	-	kein Kreis	19,56	25,2
200	0,5	80	400	2	-	kein Kreis	16,33	18,5
200	0,5	80	400	4	4,02	Kreisbahn erkennbar	18,37	21,4
200	0,5	80	400	6	3,62	Kreisbahn erkennbar	18,83	20,0
200	0,5	80	400	8	6,71	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	17,69	21,0
200	0,6	80	400	0	-	kein Kreis	15,01	30,0
200	0,6	80	400	2	-	kein Kreis	17,35	25,0
200	0,6	80	400	4	3,66	Kreisbahn schwer erkennbar	15,92	25,6
200	0,6	80	400	6	7,04	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	18,09	27,6
200	0,6	80	400	8	7,60	Kreisbahn erkennbar	24,00	25,4
200	0,7	80	400	0	-	kein Kreis	17,69	29,0
200	0,7	80	400	2	4,01	Kreisbahn schwer erkennbar	18,08	27,8
200	0,7	80	400	4	5,07	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	18,32	30,6
200	0,7	80	400	6	5,53	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	17,58	28,0
200	0,7	80	400	8	7,86	Kreisbahn erkennbar	16,97	30,8
200	0,8	80	400	0	-	kein Kreis	14,74	26,4
200	0,8	80	400	2	-	kein Kreis	14,67	32,5
200	0,8	80	400	4	5,70	Kreisbahn erkennbar	13,20	32,5
200	0,8	80	400	6	7,98	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	16,15	29,8
200	0,8	80	400	8	9,39	Kreisbahn erkennbar	19,92	28,4

Tab. A11-2 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase für das TiAl-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle								
f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	S_{puls}
Hz	ms	A	A	A	m/s		m/s	mm
80	0,8	80	400	0	-	kein Kreis	23,50	37,3
80	0,8	80	400	2	-	kein Kreis	27,52	33,7
80	0,8	80	400	4	6,92	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	28,96	32,9
80	0,8	80	400	6	6,75	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	24,50	34,5
80	0,8	80	400	8	7,37	Kreisbahn erkennbar	20,51	31,5
80	0,8	80	500	0	-	kein Kreis	21,28	34,9
80	0,8	80	500	2	-	kein Kreis	24,91	38,5
80	0,8	80	500	4	4,42	Kreisbahn erkennbar	21,76	33,9
80	0,8	80	500	6	6,25	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	23,83	35,7
80	0,8	80	500	8	6,48	Kreisbahn erkennbar	21,01	37,5
80	0,8	80	600	0	-	kein Kreis	20,19	32,9
80	0,8	80	600	2	-	kein Kreis	25,18	31,0
80	0,8	80	600	4	4,71	Kreisbahn erkennbar	26,37	36,3
80	0,8	80	600	6	6,94	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	24,91	33,5
80	0,8	80	600	8	8,69	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	27,04	39,1

Tab. A12 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase bei Variation der Spulenstrompulsdauer für das Ti-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle				Magnetstromquelle						
f_P	t_P	I_G	I_P	t_{vor}	t_{nach}	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	s_{puls}
Hz	ms	A	A	ms	ms	A	m/s		m/s	mm
200	0,7	80	400	0	0	8	6,08	Kreisbahn gut erkennbar	16,56	21,8
200	0,7	80	400	0	0,8	8	5,65	Kreisbahn erkennbar	15,65	24,2
200	0,7	80	400	0	1,6	8	5,70	Kreisbahn schlecht erkennbar	15,47	25,2
200	0,7	80	400	0	2,4	8	5,23	Kreisbahn schlecht erkennbar	15,42	24,6
200	0,7	80	400	0	3,2	8	-	kein Kreis	15,50	24,2
200	0,7	80	400	0,6	0	8	6,14	Kreisbahn erkennbar	14,52	24,2
200	0,7	80	400	1,4	0	8	4,94	Kreisbahn schlecht erkennbar	13,84	22,8
200	0,7	80	400	2,2	0	8	-	Kreisbahn nicht erkennbar	15,88	25,8
200	0,7	80	400	3	0	8	-	kein Kreis	14,52	25,6
200	0,7	80	400	0,6	0,8	8	4,13	Kreisbahn schlecht erkennbar	15,88	26,2
200	0,7	80	400	1,2	1,6	8	-	kein Kreis	14,97	23,6
80	0,8	80	600	0	0	8	4,07	Kreisbahn gut erkennbar	19,73	29,0
80	0,8	80	600	0	2	8	4,51	Kreisbahn erkennbar	19,05	28,4
80	0,8	80	600	0	4	8	4,19	Kreisbahn erkennbar	18,83	29,8
80	0,8	80	600	0	6	8	-	Kreisbahn unvollständig	18,15	28,0
80	0,8	80	600	0	8	8	-	Kreisbahn unvollständig	19,51	28,0
80	0,8	80	600	1,7	0	8	5,53	Kreisbahn erkennbar	17,69	29,0
80	0,8	80	600	3,7	0	8	5,45	Kreisbahn erkennbar	18,15	28,8
80	0,8	80	600	5,7	0	8	-	kein Kreis	17,92	28,0
80	0,8	80	600	7,7	0	8	-	kein Kreis	18,37	29,6
80	0,8	80	600	2	2	8	6,58	Kreisbahn erkennbar	17,92	28,4
80	0,8	80	600	4	4	8	-	kein Kreis	16,79	28,8

Tab. A13 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase bei Variation der Spulenstrompulsdauer für das Cr-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle				Magnetstromquelle							
f_P	t_P	I_G	I_P	t_{vor}	t_{nach}	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	s_{puls}	
Hz	ms	A	A	ms	ms	A	m/s		m/s	mm	
200	0,7	80	400	0	0	8	5,38	Kreisbahn gut erkennbar	12,02	17,1	
200	0,7	80	400	0	0,8	8	4,31	Kreisbahn erkennbar	10,66	16,3	
200	0,7	80	400	0	1,6	8	4,01	Kreisbahn schlecht erkennbar	11,12	16,9	
200	0,7	80	400	0	2,4	8	-	Kreisbahn unvollständig	11,12	15,7	
200	0,7	80	400	0	3,2	8	-	kein Kreis	9,98	15,5	
200	0,7	80	400	0,6	0	8	4,28	Kreisbahn erkennbar	9,03	14,7	
200	0,7	80	400	1,4	0	8	3,60	Kreisbahn erkennbar	9,75	15,9	
200	0,7	80	400	2,2	0	8	3,38	Kreisbahn schlecht erkennbar	11,57	18,5	
200	0,7	80	400	3	0	8	-	kein Kreis	10,43	16,1	
200	0,7	80	400	0,6	0,8	8	3,69	Kreisbahn erkennbar	10,21	15,7	
200	0,7	80	400	1,2	1,6	8	-	kein Kreis	10,43	16,7	
80	0,8	80	600	0	0	8	4,56	Kreisbahn gut erkennbar	11,57	18,8	
80	0,8	80	600	0	2	8	3,26	Kreisbahn erkennbar	12,70	20,2	
80	0,8	80	600	0	4	8	3,89	Kreisbahn schlecht erkennbar	13,38	21,0	
80	0,8	80	600	0	6	8	-	kein Kreis	13,61	19,8	
80	0,8	80	600	0	8	8	-	kein Kreis	12,25	20,2	
80	0,8	80	600	1,7	0	8	3,61	Kreisbahn erkennbar	12,88	21,4	
80	0,8	80	600	3,7	0	8	3,28	Kreisbahn schlecht erkennbar	11,57	19,6	
80	0,8	80	600	5,7	0	8	2,74	Kreisbahn schlecht erkennbar	12,02	19,8	
80	0,8	80	600	7,7	0	8	-	kein Kreis	11,39	19,8	
80	0,8	80	600	2	2	8	4,10	Kreisbahn erkennbar	11,84	20,0	
80	0,8	80	600	4	4	8	-	kein Kreis	12,48	20,4	

Tab. A14 Gemessene Fußpunktgeschwindigkeiten in der Grundstrom- und Pulsstromphase und Ausbreitungswege in der Pulsstromphase bei Variation der Spulenstrompulsdauer für das TiAl-Target ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2)

Bogenstromquelle				Magnetstromquelle							
f_P	t_P	I_G	I_P	t_{vor}	t_{nach}	I_{mag}	v_{kreis}	Bemerkungen	v_{puls}	s_{puls}	
Hz	ms	A	A	ms	ms	A	m/s		m/s	mm	
200	0,7	80	400	0	0	8	7,86	Kreisbahn erkennbar	16,97	30,8	
200	0,7	80	400	0	0,8	8	5,94	Kreisbahn erkennbar	19,99	28,6	
200	0,7	80	400	0	1,6	8	6,29	Kreisbahn schwer erkennbar	26,31	29,2	
200	0,7	80	400	0	2,4	8	-	Kreisbahn nicht erkennbar	23,29	24,8	
200	0,7	80	400	0	3,2	8	-	kein Kreis	21,63	25,2	
200	0,7	80	400	0,6	0	8	6,41	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	27,75	31,0	
200	0,7	80	400	1,4	0	8	-	Kreisbahn unvollständig	25,18	32,1	
200	0,7	80	400	2,2	0	8	-	kein Kreis	23,82	36,1	
200	0,7	80	400	3	0	8	-	kein Kreis	20,42	31,5	
200	0,7	80	400	0,6	0,8	8	5,22	Kreisbahn schwer erkennbar	19,87	25,8	
200	0,7	80	400	1,2	1,6	8	-	kein Kreis	22,23	29,8	
80	0,8	80	600	0	0	8	8,69	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	27,04	39,1	
80	0,8	80	600	0	2	8	7,36	Kreisbahn schwer erkennbar	25,14	38,7	
80	0,8	80	600	0	4	8	-	Kreisbahn nicht erkennbar	29,44	44,0	
80	0,8	80	600	0	6	8	-	kein Kreis	25,41	44,8	
80	0,8	80	600	0	8	8	-	kein Kreis	24,95	38,1	
80	0,8	80	600	1,7	0	8	5,42	Kreisbahn schwer erkennbar	35,16	41,9	
80	0,8	80	600	3,7	0	8	5,16	Kreisbahn erkennbar (spiralförmig)	25,63	43,1	
80	0,8	80	600	5,7	0	8	-	kein Kreis	23,71	38,3	
80	0,8	80	600	7,7	0	8	-	kein Kreis	22,96	38,7	
80	0,8	80	600	2	2	8	6,62	Kreisbahn schwer erkennbar	31,17	43,8	
80	0,8	80	600	4	4	8	-	kein Kreis	25,86	42,1	

Tab. A15 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das Random-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($t_{\text{vor}}, t_{\text{nach}} = 0$) bei Verwendung eines Ti-Targets (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

		Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
I_G	I_{mag}	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$
[A]	[A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
80	0	0,207	0,301	0,119	0,266	0,077	0,230
80	2	0,210	0,297	0,126	0,265	0,083	0,213
80	4	0,203	0,321	0,122	0,265	0,081	0,209
80	6	0,214	0,369	0,121	0,255	0,079	0,207
80	8	0,212	0,456	0,121	0,260	0,083	0,215
100	0	0,263	0,374	0,135	0,290	0,084	0,241
100	2	0,255	0,371	0,132	0,294	0,082	0,238
100	4	0,247	0,407	0,132	0,294	0,082	0,226
100	6	0,243	0,437	0,134	0,300	0,083	0,230
100	8	0,232	0,479	0,129	0,284	0,081	0,226
120	0	0,270	0,424	0,141	0,327	0,087	0,228
120	2	0,267	0,429	0,141	0,325	0,087	0,234
120	4	0,254	0,452	0,136	0,325	0,086	0,237
120	6	0,249	0,480	0,139	0,330	0,088	0,216
120	8	0,239	0,503	0,139	0,324	0,090	0,246
140	0	0,263	0,463	0,134	0,351	0,088	0,239
140	2	0,264	0,466	0,135	0,363	0,087	0,221
140	4	0,259	0,470	0,138	0,339	0,089	0,222
140	6	0,241	0,459	0,142	0,362	0,090	0,230
140	8	0,233	0,453	0,145	0,370	0,092	0,230

Tab. A16 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das Random-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($t_{\text{vor}}, t_{\text{nach}} = 0$) bei Verwendung eines Cr-Targets (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

		Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
I_G	I_{mag}	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$
[A]	[A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
80	0	0,155	0,244	0,095	0,227	0,051	0,139
80	2	0,149	0,275	0,090	0,244	0,047	0,147
80	4	0,140	0,299	0,089	0,231	0,046	0,147
80	6	0,131	0,289	0,087	0,233	0,046	0,158
80	8	0,126	0,371	0,081	0,256	0,043	0,152
100	0	0,162	0,306	0,093	0,254	0,051	0,156
100	2	0,160	0,316	0,096	0,259	0,053	0,186
100	4	0,149	0,308	0,092	0,297	0,049	0,165
100	6	0,143	0,312	0,093	0,267	0,049	0,184
100	8	0,134	0,262	0,094	0,283	0,049	0,180
120	0	0,153	0,308	0,095	0,269	0,058	0,141
120	2	0,159	0,346	0,097	0,226	0,059	0,159
120	4	0,150	0,286	0,096	0,307	0,056	0,161
120	6	0,142	0,251	0,096	0,297	0,059	0,144
120	8	0,138	0,335	0,097	0,307	0,056	0,163
140	0	0,163	0,338	0,104	0,271	0,069	0,148
140	2	0,159	0,417	0,104	0,323	0,067	0,177
140	4	0,154	0,322	0,103	0,328	0,066	0,155
140	6	0,150	0,236	0,104	0,292	0,067	0,151
140	8	0,142	0,259	0,111	0,358	0,064	0,162

Tab. A17 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das Random-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($t_{\text{vor}}, t_{\text{nach}} = 0$) bei Verwendung eines TiAl-Targets (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

		Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
I_G	I_{mag}	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$	$I_{\text{ionMW}}/I_{\text{arcMW}}$	$I_{\text{ionMax}}/I_{\text{arcMax}}$
[A]	[A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
80	0	0,138	0,528	0,072	0,404	0,062	0,180
80	2	0,144	0,497	0,083	0,410	0,072	0,179
80	4	0,138	0,488	0,086	0,386	0,078	0,194
80	6	0,131	0,453	0,083	0,412	0,074	0,188
80	8	0,128	0,418	0,081	0,390	0,078	0,194
100	0	0,189	0,594	0,082	0,441	0,069	0,177
100	2	0,184	0,615	0,094	0,461	0,078	0,188
100	4	0,176	0,631	0,083	0,518	0,070	0,215
100	6	0,170	0,590	0,085	0,477	0,072	0,186
100	8	0,165	0,549	0,088	0,528	0,076	0,239
120	0	0,186	0,675	0,086	0,340	0,069	0,179
120	2	0,183	0,642	0,086	0,434	0,068	0,183
120	4	0,177	0,567	0,090	0,624	0,072	0,194
120	6	0,170	0,603	0,092	0,464	0,074	0,187
120	8	0,164	0,540	0,090	0,612	0,073	0,201
140	0	0,188	0,703	0,094	0,355	0,074	0,153
140	2	0,182	0,650	0,095	0,612	0,077	0,167
140	4	0,174	0,542	0,091	0,300	0,074	0,147
140	6	0,170	0,485	0,094	0,425	0,080	0,193
140	8	0,163	0,459	0,127	0,584	0,080	0,179

Tab. A18 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($t_{\text{vor}}, t_{\text{nach}} = 0$) bei Verwendung eines Ti-Targets (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
					$\frac{I_{\text{ionMW}}}{I_{\text{arcMW}}}$	$\frac{I_{\text{ionMax}}}{I_{\text{arcMax}}}$	$\frac{I_{\text{ionMW}}}{I_{\text{arcMW}}}$	$\frac{I_{\text{ionMax}}}{I_{\text{arcMax}}}$	$\frac{I_{\text{ionMW}}}{I_{\text{arcMW}}}$	$\frac{I_{\text{ionMax}}}{I_{\text{arcMax}}}$
Hz	ms	A	A	[A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
200	0,5	80	400	0	0,263	0,597	0,182	0,687	0,025	0,232
200	0,5	80	400	2	0,241	0,622	0,169	0,717	0,025	0,285
200	0,5	80	400	4	0,237	0,581	0,168	0,631	0,024	0,263
200	0,5	80	400	6	0,232	0,585	0,177	0,683	0,025	0,277
200	0,5	80	400	8	0,225	0,608	0,182	0,723	0,025	0,239
200	0,6	80	400	0	0,270	0,580	0,188	0,671	0,029	0,296
200	0,6	80	400	2	0,261	0,600	0,199	0,727	0,030	0,314
200	0,6	80	400	4	0,253	0,616	0,192	0,661	0,029	0,263
200	0,6	80	400	6	0,251	0,604	0,185	0,647	0,029	0,295
200	0,6	80	400	8	0,238	0,644	0,161	0,691	0,029	0,225
200	0,7	80	400	0	0,268	0,604	0,196	0,692	0,032	0,303
200	0,7	80	400	2	0,269	0,612	0,176	0,719	0,033	0,314
200	0,7	80	400	4	0,262	0,570	0,164	0,722	0,031	0,309
200	0,7	80	400	6	0,248	0,597	0,159	0,666	0,031	0,244
200	0,7	80	400	8	0,243	0,599	0,150	0,724	0,030	0,311
200	0,8	80	400	0	0,278	0,608	0,174	0,766	0,032	0,289
200	0,8	80	400	2	0,268	0,614	0,166	0,663	0,034	0,355
200	0,8	80	400	4	0,266	0,614	0,169	0,632	0,034	0,298
200	0,8	80	400	6	0,259	0,624	0,145	0,669	0,033	0,310
200	0,8	80	400	8	0,256	0,597	0,155	0,705	0,035	0,290
80	0,8	80	400	0	0,243	0,605	0,133	0,708	0,030	0,332
80	0,8	80	400	2	0,245	0,521	0,142	0,613	0,035	0,243
80	0,8	80	400	4	0,230	0,506	0,122	0,579	0,032	0,276
80	0,8	80	400	6	0,234	0,576	0,128	0,686	0,031	0,309
80	0,8	80	400	8	0,226	0,573	0,124	0,636	0,032	0,279
80	0,8	80	500	0	0,265	0,584	0,137	0,656	0,028	0,261
80	0,8	80	500	2	0,274	0,600	0,141	0,704	0,026	0,285
80	0,8	80	500	4	0,261	0,568	0,128	0,649	0,023	0,239
80	0,8	80	500	6	0,255	0,613	0,127	0,691	0,023	0,285
80	0,8	80	500	8	0,245	0,608	0,127	0,671	0,025	0,234
80	0,8	80	600	0	0,279	0,618	0,159	0,587	0,024	0,237
80	0,8	80	600	2	0,263	0,605	0,140	0,669	0,023	0,247
80	0,8	80	600	4	0,251	0,622	0,129	0,653	0,022	0,246
80	0,8	80	600	6	0,247	0,653	0,122	0,656	0,021	0,214
80	0,8	80	600	8	0,238	0,603	0,127	0,712	0,021	0,249

Tab. A19 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($t_{\text{vor}}, t_{\text{nach}} = 0$) bei Verwendung eines Cr-Targets (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
					$I_{\text{ionMW}}/$ I_{arcMW}	$I_{\text{ionMax}}/$ I_{arcMax}	$I_{\text{ionMW}}/$ I_{arcMW}	$I_{\text{ionMax}}/$ I_{arcMax}	$I_{\text{ionMW}}/$ I_{arcMW}	$I_{\text{ionMax}}/$ I_{arcMax}
Hz	ms	A	A	[A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
200	0,5	80	400	0	0,221	0,677	0,142	0,772	0,016	0,233
200	0,5	80	400	2	0,202	0,585	0,131	0,673	0,016	0,289
200	0,5	80	400	4	0,190	0,583	0,124	0,647	0,015	0,274
200	0,5	80	400	6	0,171	0,550	0,105	0,633	0,012	0,282
200	0,5	80	400	8	0,169	0,634	0,109	0,682	0,013	0,212
200	0,6	80	400	0	0,237	0,685	0,162	0,723	0,020	0,269
200	0,6	80	400	2	0,230	0,660	0,150	0,710	0,018	0,375
200	0,6	80	400	4	0,225	0,719	0,121	0,793	0,014	0,345
200	0,6	80	400	6	0,202	0,721	0,124	0,735	0,015	0,268
200	0,6	80	400	8	0,193	0,717	0,116	0,735	0,014	0,279
200	0,7	80	400	0	0,229	0,578	0,182	0,612	0,023	0,267
200	0,7	80	400	2	0,230	0,611	0,161	0,650	0,021	0,270
200	0,7	80	400	4	0,203	0,652	0,123	0,651	0,016	0,273
200	0,7	80	400	6	0,202	0,560	0,127	0,664	0,017	0,210
200	0,7	80	400	8	0,189	0,645	0,119	0,674	0,016	0,232
200	0,8	80	400	0	0,228	0,568	0,179	0,688	0,026	0,318
200	0,8	80	400	2	0,246	0,658	0,162	0,686	0,021	0,293
200	0,8	80	400	4	0,216	0,690	0,141	0,835	0,018	0,246
200	0,8	80	400	6	0,219	0,704	0,134	0,686	0,017	0,254
200	0,8	80	400	8	0,199	0,707	0,120	0,727	0,016	0,207
80	0,8	80	400	0	0,204	0,704	0,121	0,614	0,015	0,202
80	0,8	80	400	2	0,200	0,693	0,119	0,625	0,014	0,174
80	0,8	80	400	4	0,185	0,683	0,117	0,596	0,014	0,186
80	0,8	80	400	6	0,176	0,589	0,109	0,652	0,014	0,263
80	0,8	80	400	8	0,163	0,505	0,106	0,659	0,014	0,253
80	0,8	80	500	0	0,231	0,677	0,155	0,782	0,015	0,243
80	0,8	80	500	2	0,208	0,673	0,138	0,862	0,014	0,346
80	0,8	80	500	4	0,201	0,695	0,125	0,809	0,013	0,268
80	0,8	80	500	6	0,186	0,701	0,117	0,738	0,012	0,222
80	0,8	80	500	8	0,172	0,685	0,109	0,809	0,011	0,241
80	0,8	80	600	0	0,225	0,667	0,169	0,928	0,014	0,252
80	0,8	80	600	2	0,217	0,685	0,144	0,700	0,012	0,238
80	0,8	80	600	4	0,197	0,686	0,122	0,747	0,010	0,333
80	0,8	80	600	6	0,196	0,706	0,112	0,849	0,009	0,203
80	0,8	80	600	8	0,182	0,655	0,107	0,630	0,009	0,147

Tab. A20 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das modifizierte Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($t_{\text{vor}}, t_{\text{nach}} = 0$) bei Verwendung eines TiAl-Targets (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

f_P	t_P	I_G	I_P	I_{mag}	Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
					$I_{\text{ionMW}}/$ I_{arcMW}	$I_{\text{ionMax}}/$ I_{arcMax}	$I_{\text{ionMW}}/$ I_{arcMW}	$I_{\text{ionMax}}/$ I_{arcMax}	$I_{\text{ionMW}}/$ I_{arcMW}	$I_{\text{ionMax}}/$ I_{arcMax}
Hz	ms	A	A	[A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
200	0,5	80	400	0	0,222	0,717	0,144	0,774	0,018	0,211
200	0,5	80	400	2	0,216	0,726	0,155	0,822	0,017	0,203
200	0,5	80	400	4	0,204	0,807	0,151	0,753	0,019	0,257
200	0,5	80	400	6	0,189	0,673	0,144	0,734	0,018	0,199
200	0,5	80	400	8	0,183	0,756	0,143	0,666	0,018	0,354
200	0,6	80	400	0	0,222	0,779	0,144	0,701	0,020	0,218
200	0,6	80	400	2	0,210	0,733	0,146	0,635	0,020	0,248
200	0,6	80	400	4	0,207	0,711	0,149	0,706	0,020	0,240
200	0,6	80	400	6	0,191	0,697	0,144	0,831	0,020	0,209
200	0,6	80	400	8	0,191	0,737	0,145	0,676	0,020	0,261
200	0,7	80	400	0	0,217	0,930	0,146	0,790	0,021	0,258
200	0,7	80	400	2	0,211	0,715	0,144	0,716	0,018	0,216
200	0,7	80	400	4	0,202	0,700	0,154	0,898	0,020	0,322
200	0,7	80	400	6	0,189	0,677	0,143	0,931	0,019	0,326
200	0,7	80	400	8	0,183	0,698	0,139	0,822	0,018	0,219
200	0,8	80	400	0	0,229	0,770	0,148	0,655	0,020	0,248
200	0,8	80	400	2	0,218	0,764	0,151	0,799	0,020	0,251
200	0,8	80	400	4	0,199	0,727	0,150	0,864	0,020	0,298
200	0,8	80	400	6	0,190	0,607	0,138	0,910	0,019	0,339
200	0,8	80	400	8	0,183	0,703	0,141	0,729	0,019	0,273
80	0,8	80	400	0	0,180	0,715	0,131	0,614	0,016	0,153
80	0,8	80	400	2	0,163	0,621	0,126	0,722	0,015	0,194
80	0,8	80	400	4	0,165	0,679	0,138	0,686	0,017	0,179
80	0,8	80	400	6	0,155	0,738	0,129	0,764	0,016	0,202
80	0,8	80	400	8	0,146	0,492	0,132	0,720	0,016	0,196
80	0,8	80	500	0	0,189	0,776	0,139	0,717	0,013	0,251
80	0,8	80	500	2	0,181	0,692	0,136	0,869	0,013	0,223
80	0,8	80	500	4	0,169	0,641	0,132	0,693	0,013	0,209
80	0,8	80	500	6	0,162	0,506	0,134	1,006	0,013	0,308
80	0,8	80	500	8	0,170	0,730	0,131	0,701	0,013	0,225
80	0,8	80	600	0	0,180	0,734	0,128	0,777	0,010	0,267
80	0,8	80	600	2	0,180	0,683	0,126	0,675	0,010	0,199
80	0,8	80	600	4	0,167	0,687	0,135	0,706	0,011	0,241
80	0,8	80	600	6	0,160	0,569	0,136	0,808	0,011	0,220
80	0,8	80	600	8	0,148	0,500	0,131	0,880	0,011	0,331

Tab. A21 Mittelwerte und Maximalwerte des Ionenstromes in Bezug auf den Bogenstrom für das Mod. Puls-Arc-Verfahren in Abhängigkeit vom synchronisierten Spulenstrom ($I_{\text{mag}} = 8 \text{ A}$) bei Variation der Spulenstrompulsdauer für ein Ti-Target (Abstand Target - Sonde: 140 mm)

f_P	t_P	I_G	I_P	t_{vor}	t_{nach}	Sonde 0°		Sonde 22,5°		Sonde 45°	
						$\frac{I_{\text{ionMW}}}{I_{\text{arcMW}}}$	$\frac{I_{\text{ionMax}}}{I_{\text{arcMax}}}$	$\frac{I_{\text{ionMW}}}{I_{\text{arcMW}}}$	$\frac{I_{\text{ionMax}}}{I_{\text{arcMax}}}$	$\frac{I_{\text{ionMW}}}{I_{\text{arcMW}}}$	$\frac{I_{\text{ionMax}}}{I_{\text{arcMax}}}$
Hz	ms	A	A	ms	ms	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]	[mA/A]
200	0,7	80	400	0	0	0,243	0,599	0,150	0,724	0,030	0,311
200	0,7	80	400	0	0,8	0,255	0,620	0,139	0,735	0,036	0,302
200	0,7	80	400	0	1,6	0,255	0,597	0,137	0,761	0,038	0,367
200	0,7	80	400	0	2,4	0,266	0,623	0,137	0,731	0,036	0,327
200	0,7	80	400	0	3,2	0,265	0,643	0,134	0,725	0,037	0,339
200	0,7	80	400	0,6	0	0,248	0,617	0,137	0,677	0,039	0,299
200	0,7	80	400	1,4	0	0,261	0,589	0,141	0,633	0,040	0,337
200	0,7	80	400	2,2	0	0,262	0,591	0,138	0,659	0,041	0,343
200	0,7	80	400	3	0	0,263	0,609	0,160	0,761	0,040	0,288
200	0,7	80	400	0,6	0,8	0,259	0,620	0,128	0,578	0,041	0,246
200	0,7	80	400	1,2	1,6	0,260	0,578	0,132	0,674	0,042	0,279
80	0,8	80	600	0	0	0,238	0,603	0,127	0,712	0,021	0,249
80	0,8	80	600	0	2	0,236	0,603	0,116	0,568	0,025	0,229
80	0,8	80	600	0	4	0,241	0,616	0,121	0,773	0,025	0,294
80	0,8	80	600	0	6	0,253	0,599	0,129	0,694	0,022	0,266
80	0,8	80	600	0	8	0,258	0,568	0,119	0,591	0,028	0,243
80	0,8	80	600	1,7	0	0,231	0,559	0,108	0,562	0,025	0,254
80	0,8	80	600	3,7	0	0,236	0,549	0,111	0,580	0,024	0,232
80	0,8	80	600	5,7	0	0,246	0,555	0,119	0,548	0,026	0,223
80	0,8	80	600	7,7	0	0,248	0,544	0,128	0,735	0,026	0,289
80	0,8	80	600	2	2	0,236	0,567	0,112	0,643	0,029	0,221
80	0,8	80	600	4	4	0,254	0,582	0,129	0,615	0,028	0,266

Tab. A22 Schichtdicke, Massenerosionskoeffizient und Beschichtungsrate für verschiedene Parameter des Bogenstromes in Abhängigkeit von der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer TiN-Beschichtung

($t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$)

f_p	t_p	I_G	I_p	I_{mag}	I_{arcMW}	Schichtdicke d_s	Massenerosions- koeffizient μ	Beschichtungsrate $\dot{d}_s / I_{\text{arcMW}}$
Hz	s	A	A	A	A	μm	$10^{-4} \text{ g}/(\text{A}\cdot\text{s})$	$\mu\text{m}/(\text{A}\cdot\text{h})$
-	-	80	-	0	81,0	2,24	0,292	0,111
-	-	80	-	8 (DC)	80,9	2,03	0,265	0,100
-	-	120	-	0	121,1	3,30	0,285	0,109
-	-	120	-	8 (DC)	120,8	3,09	0,257	0,102
200	0,5	80	400	0	100,2	3,41	0,291	0,136
200	0,5	80	400	8 (synchron)	102,5	3,29	0,265	0,128
200	0,5	80	400	8 (DC)	102,5	3,11	0,250	0,121
200	0,6	80	400	0	115,5	4,38	0,282	0,152
200	0,6	80	400	8 (synchron)	115,5	4,10	0,248	0,142
200	0,6	80	400	8 (DC)	115,4	3,86	0,253	0,134
200	0,7	80	400	0	121,3	4,75	0,272	0,157
200	0,7	80	400	8 (synchron)	121,3	4,39	0,251	0,145
200	0,7	80	400	8 (DC)	121,8	4,19	0,240	0,138
200	0,8	80	400	0	129,6	5,14	0,264	0,159
200	0,8	80	400	8 (synchron)	127,4	4,96	0,284	0,156
200	0,8	80	400	8 (DC)	128,4	4,69	0,273	0,146
80	0,8	80	400	0	99,9	3,58	0,309	0,143
80	0,8	80	400	8 (synchron)	100,4	3,35	0,285	0,133
80	0,8	80	400	8 (DC)	100,9	3,18	0,276	0,126
80	0,8	80	500	0	103,9	4,11	0,304	0,158
80	0,8	80	500	8 (synchron)	106,4	3,77	0,248	0,142
80	0,8	80	500	8 (DC)	106,1	3,80	0,264	0,143
80	0,8	80	600	0	103,3	4,03	0,301	0,156
80	0,8	80	600	8 (synchron)	103,4	3,78	0,274	0,146
80	0,8	80	600	8 (DC)	103,8	3,79	0,274	0,146

Tab. A23 Schichtdicke, Massenerosionskoeffizient und Beschichtungsrate für verschiedene Parameter des Bogenstromes in Abhängigkeit von der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer CrN-Beschichtung

($t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ;
 $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$)

f_p	t_p	I_G	I_p	I_{mag}	I_{arcMW}	Schichtdicke d_s	Massenerosions- koeffizient μ	Beschichtungsrate $\dot{d}_s / I_{\text{arcMW}}$
Hz	s	A	A	A	A	μm	$10^{-4} \text{ g}/(\text{A}\cdot\text{s})$	$\mu\text{m}/(\text{A}\cdot\text{h})$
-	-	80	-	0	82,5	1,20	0,244	0,058
-	-	80	-	8 (DC)	82,7	1,09	0,233	0,053
-	-	120	-	0	123,3	2,19	0,244	0,071
-	-	120	-	8 (DC)	122,8	1,90	0,234	0,062
200	0,5	80	400	0	101,9	2,41	0,240	0,095
200	0,5	80	400	8 (synchron)	101,5	2,21	0,234	0,087
200	0,5	80	400	8 (DC)	102,2	2,46	0,226	0,096
200	0,6	80	400	0	115,3	3,40	0,233	0,118
200	0,6	80	400	8 (synchron)	114,5	3,02	0,240	0,106
200	0,6	80	400	8 (DC)	115,2	2,92	0,234	0,101
200	0,7	80	400	0	119,0	3,69	0,245	0,124
200	0,7	80	400	8 (synchron)	119,3	3,47	0,236	0,116
200	0,7	80	400	8 (DC)	119,8	3,07	0,241	0,103
200	0,8	80	400	0	127,9	3,90	0,239	0,122
200	0,8	80	400	8 (synchron)	128,9	3,66	0,233	0,114
200	0,8	80	400	8 (DC)	129,2	3,47	0,238	0,107
80	0,8	80	400	0	100,9	2,52	0,236	0,100
80	0,8	80	400	8 (synchron)	101,6	2,35	0,231	0,093
80	0,8	80	400	8 (DC)	102,0	2,28	0,231	0,089
80	0,8	80	500	0	105,6	3,20	0,230	0,121
80	0,8	80	500	8 (synchron)	106,4	2,89	0,229	0,109
80	0,8	80	500	8 (DC)	106,9	2,40	0,233	0,090
80	0,8	80	600	0	104,1	2,94	0,222	0,113
80	0,8	80	600	8 (synchron)	104,0	2,24	0,232	0,086
80	0,8	80	600	8 (DC)	104,5	2,27	0,230	0,087

Tab. A24 Schichtdicke, Massenerosionskoeffizient und Beschichtungsrate für verschiedene Parameter des Bogenstromes in Abhängigkeit von der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer TiAlN-Beschichtung

($t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$)

f_p	t_p	I_G	I_p	I_{mag}	I_{arcMW}	Schichtdicke d_s	Massenerosions- koeffizient μ	Beschichtungsrate $\dot{d}_s/I_{\text{arcMW}}$
Hz	s	A	A	A	A	μm	$10^{-4} \text{ g}/(\text{A}\cdot\text{s})$	$\mu\text{m}/(\text{A}\cdot\text{h})$
-	-	80	-	0	80,9	2,55	0,316	0,126
-	-	80	-	8 (DC)	81,3	1,01	0,271	0,050
-	-	120	-	0	121,4	3,47	0,278	0,114
-	-	120	-	8 (DC)	121,3	1,21	0,255	0,040
200	0,5	80	400	0	100,3	3,26	0,254	0,130
200	0,5	80	400	8 (synchron)	100,3	3,06	0,244	0,122
200	0,5	80	400	8 (DC)	100,0	3,11	0,227	0,124
200	0,6	80	400	0	115,6	4,64	0,289	0,160
200	0,6	80	400	8 (synchron)	115,4	3,83	0,267	0,133
200	0,6	80	400	8 (DC)	116,5	4,01	0,260	0,138
200	0,7	80	400	0	122,0	5,15	0,297	0,169
200	0,7	80	400	8 (synchron)	121,1	4,59	0,281	0,152
200	0,7	80	400	8 (DC)	121,2	4,39	0,275	0,145
200	0,8	80	400	0	128,1	5,68	0,294	0,177
200	0,8	80	400	8 (synchron)	128,7	5,00	0,287	0,155
200	0,8	80	400	8 (DC)	129,1	5,32	0,273	0,165
80	0,8	80	400	0	96,8	4,02	0,344	0,166
80	0,8	80	400	8 (synchron)	96,0	3,41	0,317	0,142
80	0,8	80	400	8 (DC)	93,0	3,43	0,336	0,147
80	0,8	80	500	0	103,7	3,60	0,303	0,139
80	0,8	80	500	8 (synchron)	102,9	3,33	0,300	0,130
80	0,8	80	500	8 (DC)	103,6	3,59	0,299	0,139
80	0,8	80	600	0	100,7	4,47	0,291	0,178
80	0,8	80	600	8 (synchron)	98,9	3,87	0,292	0,156
80	0,8	80	600	8 (DC)	99,8	3,93	0,268	0,158

Tab. A25 Messungen zu Härte (H) und Reduced Modulus (E_r) für verschiedene Parameter des Bogenstromes in Abhängigkeit von der Art des angewendeten Magnetfeldes bei einer TiN-Beschichtung
 ($t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm; $p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ;
 $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$)

f_p	t_p	I_G	I_p	I_{mag}	I_{arcMW}	H	E_r
Hz	s	A	A	A	A	GPa	GPa
-	-	80	-	0	81,0	22,62	286,48
-	-	80	-	8 (DC)	80,9	21,93	261,98
-	-	120	-	0	121,1	20,69	333,43
-	-	120	-	8 (DC)	120,8	18,11	296,73
200	0,5	80	400	0	100,2	20,17	310,26
200	0,5	80	400	8 (syn.)	102,5	23,77	320,98
200	0,5	80	400	8 (DC)	102,5	21,84	340,48
200	0,6	80	400	0	115,5	21,47	319,79
200	0,6	80	400	8 (syn.)	115,5	20,23	324,09
200	0,6	80	400	8 (DC)	115,4	21,82	304,05
200	0,7	80	400	0	121,3	20,67	394,28
200	0,7	80	400	8 (syn.)	121,3	21,56	280,55
200	0,7	80	400	8 (DC)	121,8	20,65	313,74
200	0,8	80	400	0	129,6	22,90	386,76
200	0,8	80	400	8 (syn.)	127,4	26,21	409,45
200	0,8	80	400	8 (DC)	128,4	20,77	368,41
80	0,8	80	400	0	99,9	19,25	322,00
80	0,8	80	400	8 (syn.)	100,4	21,71	316,19
80	0,8	80	400	8 (DC)	100,9	23,71	329,64
80	0,8	80	500	0	103,9	18,96	318,75
80	0,8	80	500	8 (syn.)	106,4	21,86	302,01
80	0,8	80	500	8 (DC)	106,1	20,88	288,11
80	0,8	80	600	0	103,3	19,32	394,50
80	0,8	80	600	8 (syn.)	103,4	17,18	271,91
80	0,8	80	600	8 (DC)	103,8	17,89	275,53

Tab. A26 Dropletanalyse für verschiedene Parameter des Bogenstromes in Abhängigkeit von der Art des angewendeten Magnetfeldes bei TiN-Beschichtungen ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm)

f_p	t_p	I_G	I_p	I_{mag}	0,5-1 μm	1,01-2 μm	2,01-5 μm	5,01-10 μm	10,01-20 μm	20,01-30 μm	gesamt
Hz	ms	A	A	A	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	%
-	-	80	-	0	0,18	1,51	4,09	1,90	0,86	0	8,5
-	-	80	-	8 (DC)	0,16	1,24	3,19	1,77	0,80	0	7,2
-	-	120	-	0	0,11	1,14	3,48	1,76	0,11	0	6,6
-	-	120	-	8 (DC)	0,14	1,12	3,11	1,69	0,78	0	6,8
200	0,5	80	400	0	0,15	1,42	4,68	2,64	1,26	0	10,2
200	0,5	80	400	8 (syn.)	0,18	1,47	4,02	1,50	1,15	0	8,3
200	0,5	80	400	8 (DC)	0,17	1,34	4,38	2,28	1,34	0	9,5
200	0,6	80	400	0	0,15	1,39	4,31	2,49	1,34	0	9,7
200	0,6	80	400	8 (syn.)	0,14	1,47	3,69	2,44	0,61	0	8,4
200	0,6	80	400	8 (DC)	0,15	1,51	3,67	2,13	0,58	0	8,0
200	0,7	80	400	0	0,20	1,71	5,43	3,13	0,86	0,53	11,9
200	0,7	80	400	8 (syn.)	0,20	1,59	4,69	2,09	0,41	0	9,0
200	0,7	80	400	8 (DC)	0,18	1,61	4,24	2,37	0,82	0	9,2
200	0,8	80	400	0	0,20	1,69	4,59	2,37	1,35	0,79	11,0
200	0,8	80	400	8 (syn.)	0,18	1,83	5,03	3,03	1,31	0	11,4
200	0,8	80	400	8 (DC)	0,18	1,78	5,92	3,76	1,69	1,28	14,6
80	0,8	80	400	0	0,21	1,74	5,56	3,18	1,28	0	12,0
80	0,8	80	400	8 (syn.)	0,16	1,43	3,76	2,18	0,97	0	8,5
80	0,8	80	400	8 (DC)	0,17	1,64	3,85	2,15	0,72	0	8,5
80	0,8	80	500	0	0,17	1,81	6,67	3,97	1,40	0,44	14,4
80	0,8	80	500	8 (syn.)	0,19	1,50	3,79	1,65	0,71	0	7,8
80	0,8	80	500	8 (DC)	0,16	1,62	4,10	2,13	0,64	0	8,7
80	0,8	80	600	0	0,17	1,73	5,68	3,60	0,82	0,40	12,4
80	0,8	80	600	8 (syn.)	0,16	1,44	4,25	2,54	1,00	0,27	9,7
80	0,8	80	600	8 (DC)	0,16	1,64	5,59	3,37	1,63	0,53	12,9

Tab. A27 Dropletanalyse für verschiedene Parameter des Bogenstromes in Abhängigkeit von der Art des angewendeten Magnetfeldes bei CrN-Beschichtungen ($p = 1 \text{ Pa}$, N_2 ; $U_{\text{Bias}} = -200 \text{ V}$; $t_{\text{Besch}} = 15 \text{ min}$; Abstand Target - Substrat: 220 mm)

f_p	t_p	I_G	I_p	I_{mag}	0,5-1 μm	1,01-2 μm	2,01-5 μm	5,01-10 μm	10,01-20 μm	20,01-30 μm	gesamt
Hz	ms	A	A	A	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	Flächen- anteil %	%
-	-	80	-	0	0,27	1,35	1,00	0,15	0,19	0	2,9
-	-	80	-	8 (DC)	0,25	1,43	0,84	0,14	0	0	2,7
-	-	120	-	0	0,20	1,32	1,46	0,27	0	0	3,2
-	-	120	-	8 (DC)	0,23	1,51	1,28	0,12	0	0	3,1
200	0,5	80	400	0	0,28	1,57	1,27	0,33	0,53	0	4,0
200	0,5	80	400	8 (syn.)	0,19	0,99	0,87	0,43	0,12	0	2,6
200	0,5	80	400	8 (DC)	0,15	0,94	0,58	0,14	0,37	0	2,2
200	0,6	80	400	0	0,18	1,39	2,15	0,74	0,07	0	4,5
200	0,6	80	400	8 (syn.)	0,15	0,97	0,86	0,28	0	0	2,3
200	0,6	80	400	8 (DC)	0,24	1,42	1,08	0,02	0,07	0	2,8
200	0,7	80	400	0	0,18	1,14	1,02	0,12	0	0	2,5
200	0,7	80	400	8 (syn.)	0,21	1,30	0,96	0,14	0	0	2,6
200	0,7	80	400	8 (DC)	0,29	1,97	1,60	0,20	0,08	0	4,1
200	0,8	80	400	0	0,21	1,46	1,16	0,13	0	0	3,0
200	0,8	80	400	8 (syn.)	0,23	1,46	1,30	0,02	0	0	3,0
200	0,8	80	400	8 (DC)	0,25	1,46	0,93	0,05	0	0	2,7
80	0,8	80	400	0	0,20	1,32	0,79	0,06	0	0	2,4
80	0,8	80	400	8 (syn.)	0,24	1,45	0,80	0,03	0	0	2,5
80	0,8	80	400	8 (DC)	0,18	1,16	0,71	0,03	0	0	2,1
80	0,8	80	500	0	0,20	1,26	1,08	0,13	0	0	2,7
80	0,8	80	500	8 (syn.)	0,18	1,04	0,63	0,09	0	0	1,9
80	0,8	80	500	8 (DC)	0,22	1,35	0,63	0,05	0,10	0	2,3
80	0,8	80	600	0	0,29	1,27	0,67	0,11	0	0	2,3
80	0,8	80	600	8 (syn.)	0,18	1,21	0,50	0,18	0	0	2,1
80	0,8	80	600	8 (DC)	0,15	0,87	0,49	0,04	0	0	1,6

Schriftliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberatung in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Rogätz, 20.06.2006

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Name: Enrico Hettkamp
Familienstand: verheiratet, 1 Kind
Staatsangehörigkeit: BRD
Geburtsdatum: 05.11.1970
Geburtsort: Weida
Eltern: Margitta Hettkamp, geb. Heinath
Hilmar Hettkamp

Ausbildung

1976 - 1986 Polytechnische Oberschule „Otto Grotewohl“ Rogätz
1986 - 1989 Erweiterte Oberschule „Ernst Thälmann“ Wolmirstedt
1989 - 1990 Wehrdienst, Zivildienst
1990 - 1997 Hochschulstudium in der Fachrichtung Elektrotechnik /
Leistungselektronische Geräte und Anlagen an der Otto-
von-Guericke-Universität Magdeburg
(Abschluss als Diplomingenieur für Elektrotechnik)

Berufliche Tätigkeit

01.11.1997 - 31.03.1998 wissenschaftliche Hilfskraft mit Abschluss an der Otto-
von-Guericke-Universität Magdeburg (Institut Allgemei-
ne Elektrotechnik und Leistungselektronik)
seit 01.05.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Otto-von-Guericke-
Universität Magdeburg (Institut für Elektrische Energie-
systeme)

Rogätz, 20.06.2006