

Universität der Bundeswehr München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Entwicklung des Mehranoden DC-Plasmagenerators „Delta Gun“

Mark Dzulko

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr.-Ing. U. Barabas
1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. K. D. Landes
2. Berichterstatter: Priv. Doz. Dr.-Ing. habil. W. Tiller

Tag der Prüfung: 29.1.2007

Mit der Promotion erlangter akademischen Grad:
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

Neubiberg, den 30.1.2007

Mein herzlicher Dank gilt

Herrn Prof. Dr.-Ing. K.D. Landes für die fürsorgliche Betreuung der Arbeit und das stets offene Ohr für alle Belange.

Herrn Dr.-Ing. J. Zierhut für die herausragende Zusammenarbeit und die wertvolle Unterstützung, ohne die die Fertigstellung dieser Arbeit fraglich gewesen wäre.

Herrn Dr.-Ing. G. Forster für die entspannenden Diskussionen.

Herrn Dr.-Ing. E. Theophile und Herrn Dipl.-Ing. S. Zimmermann für die freundschaftliche Atmosphäre im Labor.

Herrn Dipl.-Ing. R. Graf ohne den so manche Präsentation farblos ausgefallen wäre.

Herrn U. Bayrle, Herrn H. Karl, Herrn A. Mai und Herrn M. Goretzki die als Werkstatt sowohl nach technischer Zeichnung, aber auch nach grober Beschreibung, das Unmögliche möglich gemacht haben.

Frau S. Kütt für die organisatorische Unterstützung, besonders im Bereich Dienstreisen.

Herrn W. Wagner, als Seele des Labors, dem kein Weg zu beschwerlich war, um die akuten Probleme der Laborlogistik zu lösen.

Herrn G. Haderer dem Wächter der elektronischen Datenspeicher für die Pflege aller Bits und Bytes.

Herrn Dr.-Ing. Nassenstein und der Firma GTV für die unkomplizierte Zusammenarbeit und die finanzielle Unterstützung.

meiner Verlobten Veronika für das Verständnis und die Ausdauer in den letzten Jahren.

Meinen Eltern für Alles.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Thermisches Beschichten mittels DC- Plasmageneratoren.....	8
2.1	Überblick verschiedener Verfahren des Beschichtens mit thermischen Spritzprozessen ..	8
2.2	Applikationsfeld plasmagespritzter Schichten	11
2.3	Pulvereingabe und Schichtbildung	12
2.4	Funktionsprinzipien konventioneller DC –Plasmageneratoren.....	14
2.4.1	Einzellichtbogensysteme	19
2.4.2	Mehrlichtbogensysteme.....	21
3	Entwicklung des Mehranodengenerators „Delta Gun“.....	25
3.1	Funktionsprinzip	26
3.2	Elektrische Beschaltung und Zündung	27
3.3	Betriebsparameter und Kennlinien	29
3.4	Potentialverlauf im Inneren der Düse	30
3.5	Thermische Belastung der Anodensegmente	38
3.6	Kathodentemperaturmessung	40
3.7	Konstruktive Merkmale des Plasmagenerators Delta-Gun	45
3.7.1	Generatorstandzeiten	46
3.7.2	Kühlprinzip	46
3.7.3	Schnellwechseldüse	47
3.7.4	Schnellwechselkathode	48
3.7.5	Pulvereingabe.....	49
3.7.6	Düsenkonturen	50
4	Entwicklung und Adaption von Diagnostiken zur Charakterisierung des Plasma- und Partikelstrahls.....	51
4.1	Computertomografie	52
4.2	Hochgeschwindigkeitsaufnahmen	60
4.3	Particle Flux Imaging	64
4.4	Volumenpyrometrie	65
4.5	Partikelgeschwindigkeitsmessung	71
4.6	Modulation der anodischen Fusspunkte.....	75
4.7	Beschichtungsversuche	79
5	Zusammenfassung und Ausblick	81

6	Anhang.....	84
6.1	Verzeichnis der verwendeten Symbole	84
6.2	Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	87
6.3	Literaturverzeichnis.....	88
6.4	Abbildungsverzeichnis	91

1 Einleitung

In Forschung und Industrie werden zunehmend Werkstoffkombinationen entwickelt, welche die jeweils positiven Eigenschaften der Einzelkomponenten nutzen und vereinen. Damit lässt sich eine nochmalige Steigerung der Funktionseigenschaften erreichen und neue Applikationsfelder können erschlossen werden. Durch die Erzeugung von funktionalen Schichten werden beispielsweise Eigenschaften wie Korrosions- und Verschleißschutz, Gleitfähigkeit oder auch elektrische und thermische Isolation deutlich erhöht.

Zur Herstellung derartiger Schichten werden seit 1950 Methoden der thermischen Beschichtung eingesetzt. Dabei wird das meist pulverförmige Beschichtungsmaterial mittels des Plasmastrahls eines DC-Plasmagenerators aufgeheizt und beschleunigt. Mit hoher Geschwindigkeit treffen die aufgeschmolzenen Pulverpartikel auf den Grundwerkstoff, erstarren dort und bilden eine Schicht. Qualitätsmerkmale einer so generierten Schicht sind beispielsweise Schichtdicke, Porosität, Härte, Haftzugfestigkeit und Oberflächenbeschaffenheit.

Bei der Applikation thermisch gespritzter Schichten werden hohe Anforderungen an die Prozessführung und den Plasmagenerator gestellt. Vor allem der Plasmagenerator stellt dabei eine häufige Fehlerquelle im Bereich der Stationarität und Homogenität mit entsprechenden negativen Auswirkungen auf die erzeugte Schicht dar.

Konventionelle Einzellichtbogensysteme stoßen hier aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften an ihre Grenzen und werden daher den hohen Anforderungen nicht gerecht. Deshalb wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Plasmageneratoren mit unterschiedlichen physikalischen Prinzipien entwickelt. Als besonders geeignet kristallisieren sich Mehrlichtbogensysteme heraus. Prinzipiell können Mehrlichtbogensysteme auf zwei Arten realisiert werden:

- Lichtbogenteilung im Bereich der Kathoden
- Lichtbogenteilung im Bereich der Anoden

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem innovativen Plasmabrenner „Delta-Gun“, der durch eine Kathode und drei Anoden gekennzeichnet ist und daher nach dem Prinzip *Lichtbogenteilung im Bereich der Anoden* funktioniert.

Im Folgenden werden zunächst konventionelle Generatoren diskutiert und die physikalische Ursache für ihre Instationaritäten dargestellt. Im Anschluss daran erfolgt eine ausführliche Beschreibung des neuentwickelten Plasmagenerators „Delta-Gun“ mit seinen spezifischen Eigenschaften. Eine Reihe neuentwickelter und adaptierter Messsysteme unterstützen dabei die Qualifizierung und dienen zum besseren Verständnis der physikalischen Abläufe innerhalb und außerhalb des Generators. Während im Inneren vor allem die Lichtbogeneffekte untersucht werden, bildet im Außenbereich des Generators die Wechselwirkung des Plasmas mit dem eingegebenen Pulver den Schwerpunkt der Betrachtung.

2 Thermisches Beschichten mittels DC- Plasmageneratoren

Das nachfolgende Kapitel befasst sich im Rahmen des Verfahrensbereiches *Thermisches Beschichten durch elektrische Gasentladung* mit der speziellen Technologie des *Plasmaspritzens unter atmosphärischen Bedingungen*.

Anschließend wird die Schichterzeugung auf dem Substrat sowie die Wechselwirkungen zwischen Pulver und dem heißen Gas- bzw. Plasmastrahl behandelt. Hierzu werden die physikalischen Vorgänge und Mechanismen definiert, die für die Schichtbildung verantwortlich sind.

Fokussierend auf DC- Plasmageneratoren, deren Weiterentwicklung den Schwerpunkt dieser Arbeit bildet, erfolgt in einem kurzen Überblick die Beschreibung der Plasmastrahlerzeugung durch verschiedenartige DC- Plasmageneratoren unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Funktionsprinzipien. Den Abschluss dieses Kapitels bildet die Analyse der Eigenschaften neuartiger Plasmageneratoren, mit denen eine verbesserte Pulverbehandlung ermöglicht wird.

2.1 Überblick verschiedener Verfahren des Beschichtens mit thermischen Spritzprozessen

Alle Beschichtungsverfahren sind durch das in Abb. 1 gezeigte Funktionsschema gekennzeichnet. Mittels einer Energiequelle wird chemische oder elektrische Energie dazu verwendet, die Enthalpie eines Gases maßgeblich zu steigern. Das führt in den meisten Fällen nicht nur zu einer Beschleunigung, sondern vor allem zu einer derartigen Temperaturerhöhung des Gases, dass es bei wichtigen technischen Anwendungen thermischer Beschichtungsprozesse in den Plasmazustand überführt wird [1]. Der in fester Form in den Plasmastrahl zugegebene Beschichtungswerkstoff wird beschleunigt und aufgeschmolzen. Teils mit teils ohne vorherige Stoffumwandlung oder chemische Reaktion trifft das Material als Strahl schmelzflüssiger Partikel auf die Oberfläche des zu beschichtenden Substrates. Die Schmelztropfen werden beim Aufprall zu Lamellen deformiert, die erstarren, sich mit dem Untergrund verklammern und durch Überlagerung nacheinander auftreffender Partikel sukzessiv eine Schicht auf dem Substrat bilden.

Lediglich beim Kaltgasspritzen, das üblicherweise den thermischen Spritzprozessen zugeordnet wird, erfolgt die Energiesteigerung der Partikel zunächst nur durch deren Beschleunigung. Erst beim Aufprall auf das Substrat findet die Umwandlung der kinetischen in die thermische Energie und damit das Aufschmelzen der Partikel statt.

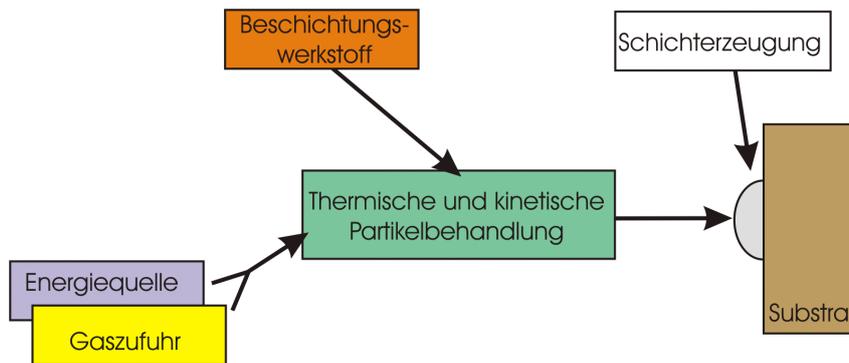


Abb. 1: Funktionsprinzip der Thermischen Beschichtung

Die Technik des Thermischen Beschichtens hat sich in ihrem ca. 50jährigen Bestehen stetig weiterentwickelt und es haben sich mehrere parallele Zweige herausgebildet, denen unterschiedliche physikalische Prinzipien zugrunde liegen /2/. So muss beispielsweise bei den Beschichtungswerkstoffen zwischen drahtförmigem, pulverförmigem und in Ausnahmefällen flüssigem Ausgangszustand unterschieden werden. Auch Kombinationen verschiedener Prozessvarianten werden industriell eingesetzt. In Abb. 2 ist eine Übersicht der wichtigsten Verfahren mit ihren jeweiligen charakteristischen Eigenschaften dargestellt:

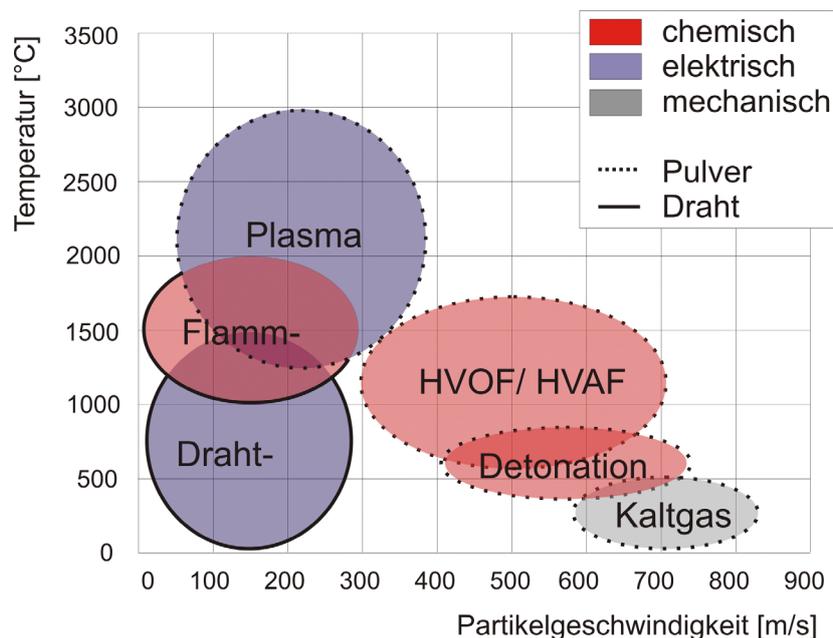


Abb. 2: Übersicht verschiedener thermischer Beschichtungsprozesse

Aktuelle Entwicklungen im Gebiet des thermischen Beschichtens zielen zunehmend darauf ab, den Bereich hoher Geschwindigkeiten und Temperaturen der Spritzpartikel abzudecken. Der Hochtemperaturbereich ist dabei nicht durch chemische Verfahren zu erreichen und bietet damit den plasmagestützten Verfahren ein hohes Entwicklungspotential.

2.2 Applikationsfeld plasmagespritzter Schichten

Der Schwerpunkt der hier vorliegenden Arbeit ist das DC- Plasmaspritzverfahren. Da für das Aufschmelzen des Spritzguts Temperaturen über 10.000 K zur Verfügung stehen, können auch schwerschmelzende oxidkeramische Pulver bzw. Pulvergemische wie Aluminiumoxid, Aluminiumoxid/ Titandioxid, Zirkoniumoxid und Chromoxid als Spritzwerkstoffe verwendet werden. Mit diesen Materialien lassen sich Hochleistungsschichten für zahlreiche technische Anwendungen realisieren. Da der Plasmaspritzprozess für die Erzeugung derartiger Schichten vielfach das einzig in Frage kommende Verfahren ist, besitzt er eine dementsprechend große Bedeutung in der Oberflächentechnologie. Mit keramischen Oberflächen auf Metallen lassen sich die Eigenschaften der Keramik, wie hohe Härte und Verschleißbeständigkeit, elektrische Isolation, niedrige Wärmeleitfähigkeit und reproduzierbare Oberflächenstrukturen mit den Eigenschaften der Metalle, wie hohe mechanische Wechselfestigkeit, Zähigkeit und gute Form- bzw. Bearbeitbarkeit verbinden. Industriellen Einsatz finden diese Verfahren in allen Bereichen der Technik, in denen Bauteile hohen Temperaturen oder aggressiven Medien bei gleichzeitig starken mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Hierzu zählt der gesamte Bereich der Wärmedämm- und Verschleißschutzschichten. Beispiele hierfür sind die Beschichtungen von Turbinenschaufeln in Flugzeug- oder in stationären Gasturbinen, von Druckwalzen in der Papierindustrie als Ersatz für galvanisch aufgebraute Hartchromschichten sowie von Zylinderlaufflächen oder von Getriebeeinheiten in der Automobilindustrie.

2.3 Pulvereingabe und Schichtbildung

Die im Plasma aufgeheizten Partikel treffen in festem, angeschmolzenem oder in vollständig durchgeschmolzenem Zustand auf das Substrat auf und erfahren dort in schneller Folge eine Deformation, Abkühlung, Erstarrung, Schrumpfung und Adhäsion.

In der Literatur finden sich theoretische Untersuchungen über die Vorgänge der Schichtbildung / 3 /. Zu berücksichtigen sind neben den Werkstoffeigenschaften der Partikel auch sekundäre Einflüsse wie Eigenschaften und Oberflächenbeschaffenheit des Substrats, Kühlung und Zahl der Übergänge (Anzahl der übereinandergespritzten Schichtlagen) beim Erzeugen der Schicht.

Durch die Überlagerung vieler einzelner Spritzpartikel kommt es zur Ausbildung einer Spritzschicht mit Eigenschaften, die primär vom Zustand der auftreffenden Einzelpartikel abhängen. Beim Auftreffen auf das Werkstück flachen die schmelzflüssigen Partikel ab und bilden eine für thermisch gespritzte Schichten typische lamellenartige Schichtstruktur aus. Die Abkühlgeschwindigkeit / 4 / eines Partikels liegt abhängig vom Partikeldurchmesser, Partikelwerkstoff, Substratwerkstoff und von der Kühlung zwischen 10^5 K/s und 10^6 K/s.

Die Haftung der Schicht kommt durch eine mechanische Mikroverklammerung mit der Substratoberfläche sowie durch Verschweißungen, physikalische Adhäsions-effekte und chemische Wechselwirkungen zwischen den Spritzpartikeln und der Substratoberfläche zustande. Die Rauigkeit des Substrats, die chemische Oberflächenbeschaffenheit, die Temperatur und die Wärmeabfuhr der entstehenden Schicht an das Substrat und an die Umgebung lassen sich dabei zum Erreichen bestimmter Haftfestigkeit in einem weiten Bereich gezielt beeinflussen.

Sowohl die Festigkeit als auch die Porosität der entstehenden Schicht werden von Parametern wie Temperatur, Aufschmelzgrad, Geschwindigkeit, Auftreffwinkel und Größe der Partikel bestimmt.

Eine zusätzliche Kühlung der entstehenden Schicht oder des Substrats ermöglicht niedrige Prozesstemperaturen. Überhitzungen oder unerwünschte metallurgische Reaktionen können damit vermieden werden.

Die vorhergehend beschriebenen Effekte nehmen Einfluss auf den Auftragswirkungsgrad DE (deposition efficiency), der das Verhältnis der Masse m_A des injizierten Pulvers zur Masse m_G der auf dem Substrat abgeschiedenen Schicht angibt:

$$DE = \frac{m_G}{m_A} \cdot 100\% \quad (2-1)$$

Der Auftragswirkungsgrad wird neben den beschriebenen Haftungsmechanismen zusätzlich von der Brennerführung, der Anzahl der Schichtlagen und von geometrischen Aspekten des Substrats wie Größe und Form beeinflusst.

Für eine hohe Prozesseffizienz ist das Erzeugen einer Schicht mit definierten Eigenschaften und maximalem Auftragswirkungsgrad notwendig. Aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen stellt die Schichtoptimierung eines der zentralen Probleme in der Beschichtungstechnik dar / 5 /.

2.4 Funktionsprinzipien konventioneller DC –Plasmageneratoren

Technische Hochleistungsprozesse unterliegen dem stetigen Ziel einer Verfahrensverbesserung. Die Steigerung von Wirkungsgraden, die Erhöhung der Standfestigkeiten oder die Erweiterung der Anwendungsfelder sind Anforderungen an die Prozesse und an die funktionalen Schichten der Bauteile. Um diesen Ansprüchen gerecht zu werden, kristallisieren sich im Bereich der Energiequellen und der Beschichtungswerkstoffe die nachfolgenden Forschungsschwerpunkte heraus:

- Verkleinerung der Partikelgrößen bis Nanometerbereich („Nanopulver“)
- Erhöhung der Partikelgeschwindigkeiten
- Verringerung brennerspezifischer Instationaritäten

Diese Arbeit beschäftigt sich vor allem mit der *Verringerung der brennerspezifischen Instationaritäten* des DC- Plasmagenerators bei gleichzeitiger *Erhöhung der Partikelgeschwindigkeit*. Dazu wird ein neuartiges Brennerkonzept vorgestellt, das konzeptbedingt eine Reduzierung dieser Instationaritäten zur Folge hat.

Das Funktionsprinzip (Abb. 3) aller für das thermische Beschichten eingesetzten DC- Plasmageneratoren beruht auf einem oder mehreren Hochstromlichtbögen, die in einem düsenförmig gestalteten Raum zwischen Anode und Kathode durch Zuführung elektrischer Leistung wandstabilisiert aufrecht erhalten werden / 6 /. Das in die Düse eingegebene Gas wird aufgeheizt und beschleunigt, so dass es als heißer Gasstrahl mit hoher Geschwindigkeit ausströmt.

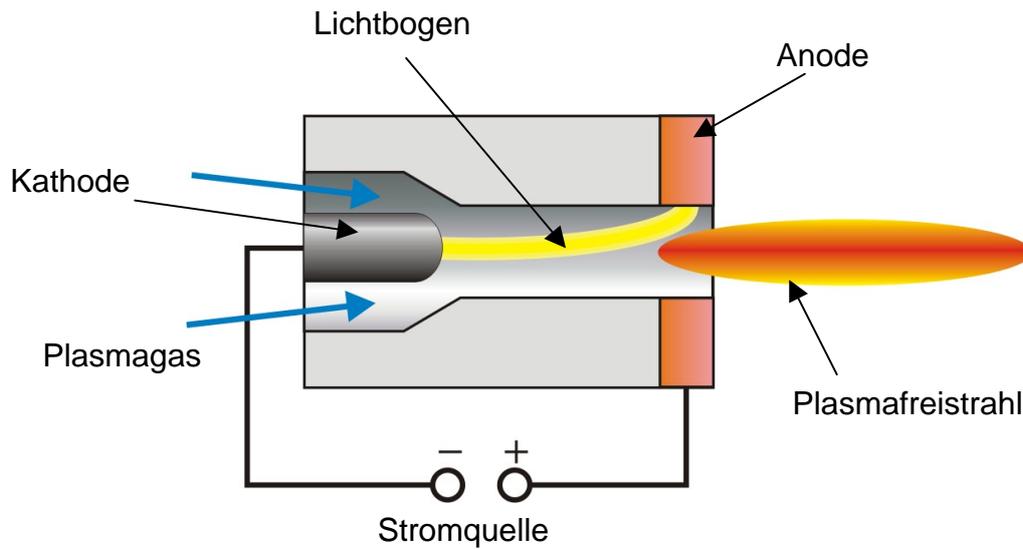


Abb. 3: Prinzip eines DC-Plasmagenerators

Betrachtet man den Potentialverlauf der Gasentladung zwischen Kathode und Anode ergeben sich die drei Teilbereiche Kathodenfallgebiet, Zentralbereich (Lichtbogensäule) und Anodenfallgebiet (Abb. 4) / 7 /.

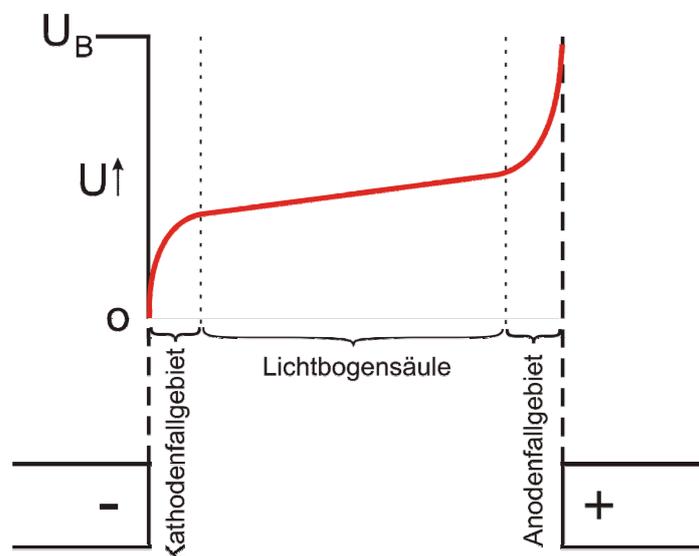


Abb. 4: Prinzipieller Potentialverlauf U_B eines Lichtbogens zwischen Kathode und Anode

Die beweglichen Elektronen, die für den Ladungstransport hauptsächlich verantwortlich sind, werden thermisch aus der Kathode emittiert und zunächst im Kathodenfallgebiet beschleunigt, bevor sie zusammen mit den weniger beweglichen Ionen das Plasma der Lichtbogensäule bilden. Nach Durchströmen der gesamten

Lichtbogensäule fallen die Elektronen im Anodenfallgebiet wieder zurück ins Leitungsband des Anodenmetalls.

Entscheidend für die drei Gebiete ist der für die Elektronenbewegung notwendige Energiebedarf, der von der äußeren Stromquelle abgedeckt werden muss. In der Literatur werden unter atmosphärischen Bedingungen als typische Gesamtspannungen für die Summe von Anoden- und Kathodenfall ca. 22 V angeführt / 6 /. Setzt man Konstanz dieser Spannung voraus, lässt sich der Spannungsabfall an der Lichtbogensäule abschätzen. Bei einer Verlängerung der Lichtbogensäule durch konstruktive Maßnahmen ergibt sich eine nahezu längenproportionale Erhöhung der umgesetzten Leistung. Dieser Sachverhalt bietet die Grundlage der später angeführten kaskadierten Brenner.

Konventionelle Plasmabrenner (F4, 9MB, SG100...) sind im Regelfall nicht kaskadiert aufgebaut. Sie besitzen eine stiftförmige Kathode sowie eine meist hohlzylindrische, einteilige Anode und sind durch nur einen Lichtbogen gekennzeichnet.

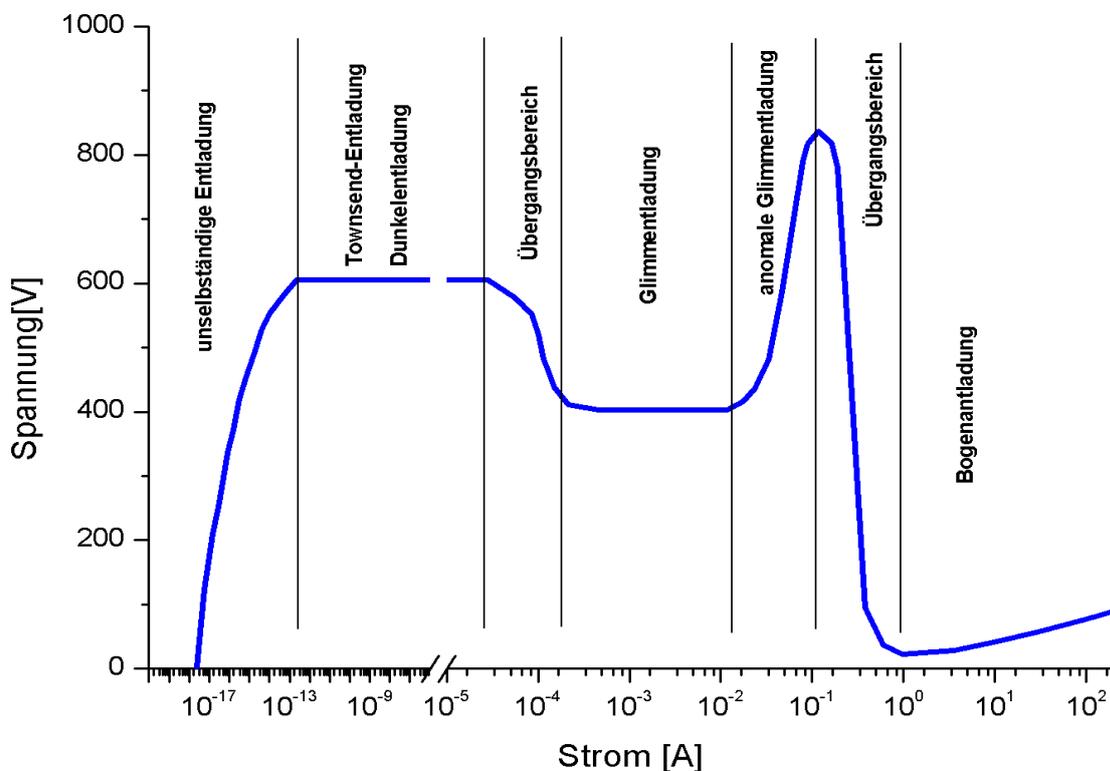


Abb. 5: Typische Kennlinie elektrischer Gasentladungen
(Edelgas bei $p=1$ mbar, Elektrodenabstand $d=10$ cm) / 8 /

Lichtbogen- oder Hochstromentladungen, wie sie in Plasmageneratoren für thermische Beschichtungsprozesse verwendet werden, bilden den stromstarken Endbereich im Spektrum der Gasentladungen (Abb. 5), welches sich über einen großen Strombereich, aber einen vergleichsweise begrenzten Spannungsbereich erstreckt.

Abb. 6 zeigt die typische Kennlinie einer Bogenentladung, die sich in Plasmageneratoren unter Verwendung von Argon als Plasmagas ergibt.

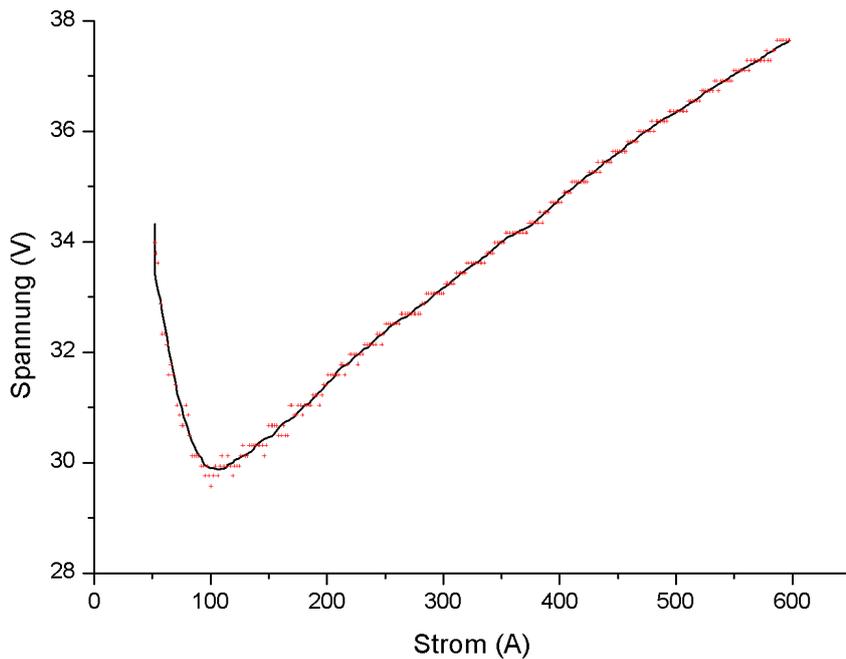


Abb. 6: Strom-Spannungskennlinie des elektrischen Lichtbogens im Industriebrenner Typ F4 der Fa. Sulzer Metco (30 slpm Ar, p=1 bar)

Der anfängliche negative differentielle Widerstand $r^* = \frac{dU}{dI} < 0$ im Strombereich < 100 A bedeutet, dass eine Zunahme des Stromes mit einer Abnahme der benötigten Spannung verbunden ist / 9 /. Diese Besonderheit der Kennlinie ist durch die hohe Steigerung der Plasmatemperatur T_p und damit gemäß der Spitzerformel (2-2) durch die erhöhte Leitfähigkeit K bei Zunahme des Lichtbogenstromes begründet.

$$K = \frac{\varepsilon_0^2 \cdot 4 \cdot \pi (2kT_p)^{\frac{3}{2}}}{Z^2 \cdot e^2 \cdot \sqrt{m_e} \ln \Lambda} = C \cdot T_p^{\frac{3}{2}} \quad (2-2)$$

Da Plasmageneratoren typischerweise stromgeprägt betrieben werden, muss die Stromquelle in der Lage sein, dieser Kennlinie zu folgen. In der Vergangenheit wurden hierzu vornehmlich thyristorgesteuerte Stromquellen in Dreieck-, Stern- oder Kombinationsschaltung verwendet. Die Restwelligkeit dieser Stromquellen und die Trägheit ihrer Reaktion auf schnelle Ereignisse sowie der Kosten- und Volumenaspekt, bedingt durch die benötigten großen Transformatoren, führten zur Entwicklung der Inverterstromquellen. Mit den heute zur Verfügung stehenden Leistungs- IGBTs sind diese Stromquellen in der Lage, trotz hoher Spannungen auch hohe Ströme im kHz-Bereich zu schalten. Damit können Stromquellen aufgebaut werden, bei denen die Restwelligkeit typischerweise unter 2% des eingestellten Sollwerts liegt.

Anhand der Strom-Spannungs-Kennlinie (U-I-Kennlinie Abb. 6) kann stromabhängig auch die umgesetzte elektrische Leistung $P_E = U \cdot I$ des Plasmagenerators bestimmt werden. Da für thermische Beschichtungsprozesse Leistungsumsätze von mindestens 30 kW notwendig sind, kann bei diesen Brennern durch alleinige Erhöhung des Stromes die benötigte Leistung unter technisch sinnvollen Gesichtspunkten nicht erreicht werden. Das Ziel einer Leistungserhöhung ohne signifikante Erhöhung des Stromes erfordert eine Steigerung der Entladungsspannung. Zu diesem Zweck wird Wasserstoff oder auch Stickstoff zum inerten Gas Argon zugemischt. Moleküllgase dissoziieren schon bei relativ niedrigen Temperaturen und nehmen dabei die Dissoziationsenergie aus der Umgebung auf. Damit wird das Plasmagas gekühlt und die Leitfähigkeit sinkt.

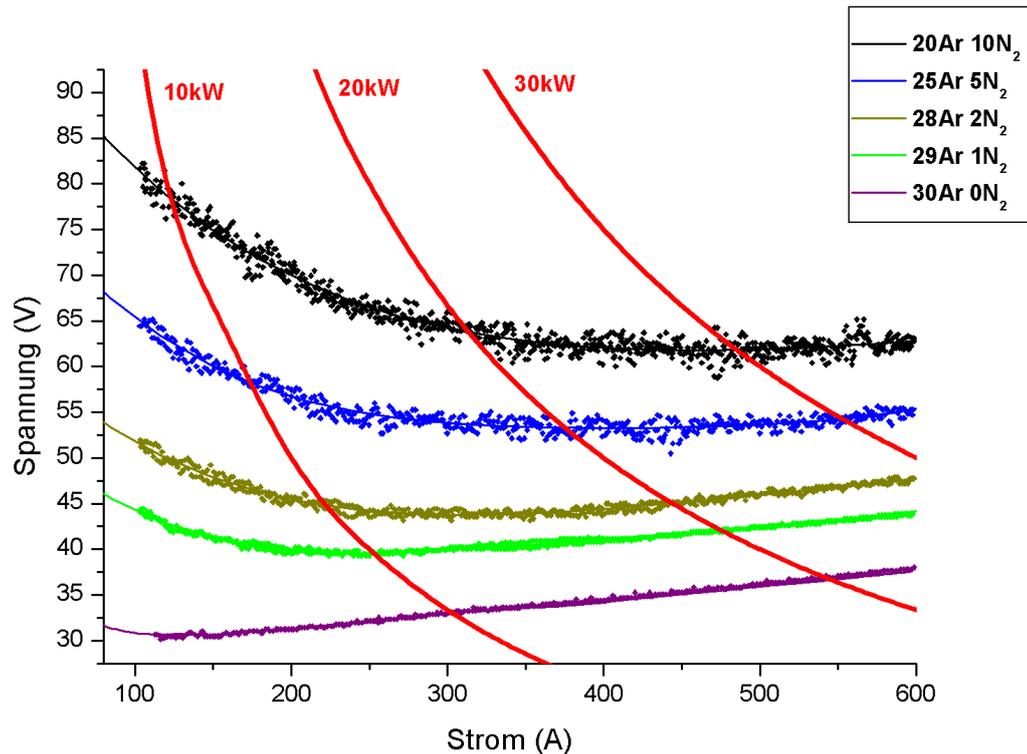


Abb. 7: Strom-Spannungskennlinien eines elektrischen Lichtbogens
(Industriebrenner Typ F4 der Fa. Sulzer Metco, mit Stickstoff als Zumischung zum Plasmagas Ar, $p=1$ bar)

Abb. 7 zeigt die Strom- Spannungskennlinien bei Bogenentladungen für Gasgemische mit variablen Anteilen von Argon und Stickstoff. Änderungen der Zusammensetzung des Plasmagases führen aber neben der angestrebten Spannungserhöhung und der damit gewünschten Leistungserhöhung auch zu einer nachteiligen Veränderung der Lichtbogeneigenschaften. Das betrifft vor allem das Auftreten von starken Fußpunktswanderungen des anodischen Bogenansatzes (siehe Kap. 2.4.1).

2.4.1 Einzellichtbogensysteme

Die konventionellen Plasmageneratoren gehören der Gruppe der Einzellichtbogensysteme an. Da alle diese Systeme sehr ähnlich aufgebaut sind, wird ihre Konstruktion exemplarisch am F4- Plasmagenerator der Firma Sulzer Metco beschrieben.

Der von einer Wolfram-Kathodenspitze ausgehende Lichtbogen wird von einer zylindersymmetrischen Düse, die zugleich als Anode fungiert, stabilisiert. Alle

Bauteile, die in unmittelbarem Kontakt zur Lichtbogensäule stehen, sind wassergekühlt.

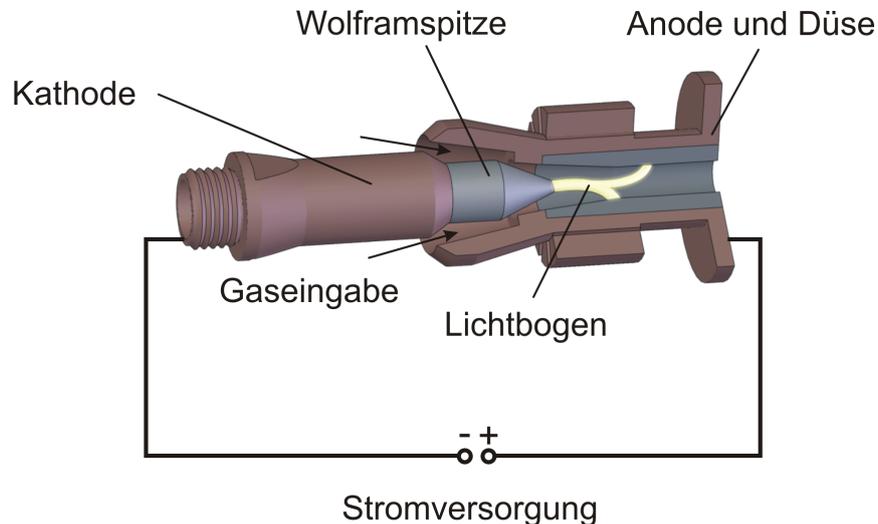


Abb. 8: Prinzip eines Einlichtbogensystems (Typ Sulzer Metco F4)

Das Plasmagas wird an der Kathode vorbei in den Düsenbereich unter einem Drallwinkel eingegeben. Die damit erzeugten Gasverwirbelungen zwingen den Lichtbogen zu Bewegungen in mehrfacher Weise. Während der kathodische Fußpunktansatz an der Spitze der Kathode nahezu fixiert ist, kann im Gegensatz dazu der anodische Ansatzpunkt in azimuthaler oder axialer Richtung wandern und besitzt damit zwei Freiheitsgrade der Bewegung / 10 /.

Beide Bewegungen werden vom Lichtbogen mit Frequenzen von typischerweise 2-4 kHz ausgeführt. Diese in der Literatur bekannten Fluktuationsfrequenzen zeigen sich unter anderem am stoßartig ausströmenden heißen Plasmagas und werden in Kapitel 4.2 optisch vermessen.

Das Pulver wird am strömungsseitigen Ende der Düse radial unter einem Winkel α zur Brennerachse (α meist 90°) von einem oder mehreren Injektoren eingegeben. Da die rotationssymmetrisch aufgebauten Brenner im Mittel auch rotationssymmetrische Plasmastrahlen erzeugen, können die Pulverinjektoren an beliebiger Stelle am Umfang angeordnet werden.

2.4.2 Mehrlichtbogensysteme

Ziel bei der Realisierung der Mehrlichtbogensysteme ist eine verbesserte Homogenität und Stationarität des austretenden Plasmastrahls. Die Systeme sind zwar komplizierter in ihrem mechanischen Aufbau, zeichnen sich aber durch geringere Fluktuationen aus. Dies spiegelt sich in einem stabilen Betriebsverhalten mit reduzierten Leistungs- und Enthalpieschwankungen wieder. Die Lichtbögen im Inneren der Düse stabilisieren sich durch das Zusammenwirken gasdynamischer und magnetischer Effekte (Pinch-Effekt) und heizen das vorbeiströmende Gas gleichmäßig auf. Als Folge ergibt sich ein Plasmastrahl geringer Turbulenz mit einer im Vergleich zu den Einkathodenbrennern effektiveren Pulveraufheizung und höherem Auftragswirkungsgrad (DE). Ein weiterer grundsätzlicher Vorteil besteht in der Erhöhung der Generator Standzeiten durch die reduzierte thermische Belastung der Anode. Fasst man modellhaft im Bereich des anodischen Fußpunktes sämtliche Aufheizungseffekte wie Konvektion, Strahlung, Elektroneneintrittsleistung und Joulsche Wärme in der Verlustleistung P_{T_A} eines zugeordneten Ersatzwiderstandes R_A zusammen, ergibt sich:

$$P_{T_A} = R_A \cdot I^2 \quad (2-3)$$

Wird der Gesamtstrom I in drei gleiche Teilströme $\tilde{I} = \frac{I}{3}$ aufgeteilt, so reduziert sich die an den drei anodischen Fußpunkten entstehende Heizleistung auf $\tilde{P}_{T_A} = R_A \cdot \tilde{I}^2 = \frac{P_{T_A}}{9}$. Dieses Prinzip wird mittels der Mehrkathodentechnik bereits seit Jahren erfolgreich in der Industrie genutzt.

Der prinzipielle Aufbau der Mehrkathodenbrenner wird anhand des Mehrkathodensystems TRIPLEX / 11 // 12 / als bekanntestem Vertreter dieses Konzepts beschrieben. Dieser Generator wurde bereits im Jahre 1991 durch die Firma Sulzer Metco patentiert und in den Markt eingeführt.

Drei gegeneinander elektrisch isolierte Kathoden mit jeweils eigener Stromeinspeisung ersetzen die einzelne Kathode konventioneller Plasmabrenner mit Einzellichtbogen (s. Kap. 2.4.1). Der Aufbau der Kathoden entspricht im wesentlichen dem der Einkathodenbrenner, ihre Durchmesser sind jedoch erheblich kleiner (vgl. Abb. 9). Wie auch bei den Einkathodenbrennersystemen wird das Gas parallel oder mit Drallwinkel zur Generatorachse in eine rotationssymmetrische Düse eingegeben.

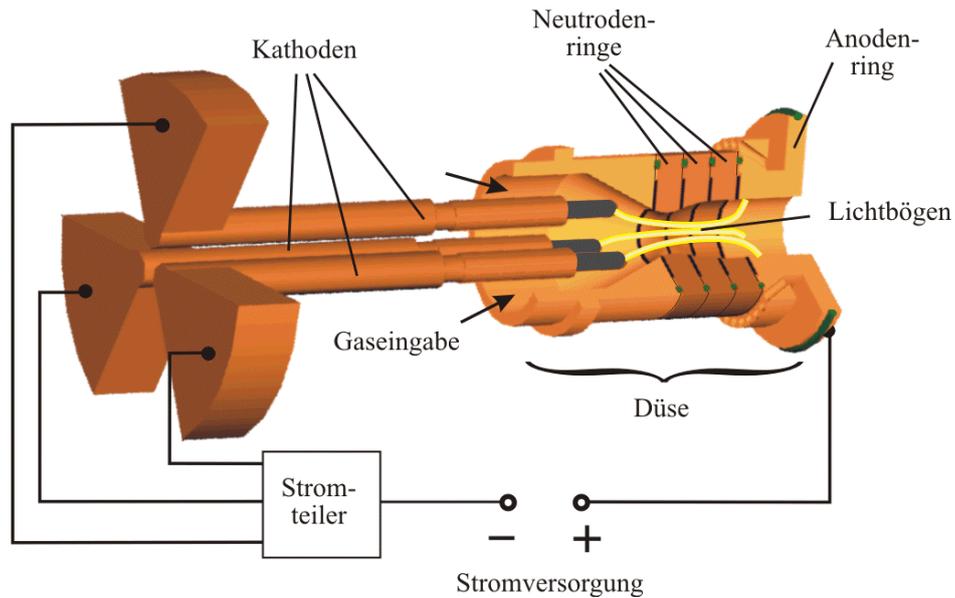


Abb. 9: Schema des Mehrkathodenbrennersystems TRIPLEX

Die Düse ist kaskadiert aufgebaut und besitzt einen dünnen anodischen Endring. Im Brennbetrieb bilden sich ausgehend von den Kathoden drei unabhängige Lichtbögen aus, die an der gemeinsamen Anode enden. Durch den vergleichsweise dünnen Endring wird der axiale Freiheitsgrad der anodischen Bogenfußpunkte erheblich eingeschränkt. Die azimuthale Bewegungsfreiheit wird ebenfalls reduziert. Als Ursache hierfür sind die kathodischen Lichtbogenansätze der räumlich außermittig positionierten Kathoden zu betrachten. Nach dem Steenbeck'schen Energieminimum Prinzip ergibt sich damit eine optimale und somit räumlich eingeschränkte Position für jeden der drei anodischen Ansätze. Da der minimale Energiebedarf der Lichtbögen jedoch nicht allein von den geometrischen, sondern auch von den elektrischen und gasdynamischen Verhältnissen abhängt, folgt daraus eine zwar parameterabhängige, aber stationäre Position der anodischen Lichtbogenansätze.

Als Konsequenz der drei sowohl kathodisch als auch anodisch fixierten Lichtbögen ergibt sich eine räumliche Stabilität der Lichtbögen mit einer konstanten Lichtbogenlänge. Da sich damit die Bogenspannungen nahezu nicht mehr verändern, erhält man unter Konstantstrombedingungen einen Leistungsumsatz P_{mittel} mit Schwankungen von $<5\% / 13 /$. Diese räumlich und zeitlich konstanten Bedingungen ermöglichen eine gleichmäßige Gasaufheizung mit der Konsequenz eines nahezu fluktuationfreien Plasmafreistrahls mit einer Dreifach-Symmetrie.

Wie bei den Einkathodenbrennern erfolgt die Pulverzugabe üblicherweise radial durch einen oder mehrere Pulverinjektoren. Durch die Dreifach-Symmetrie des Plasmafreistrahls ergibt sich jedoch bei diesem Generatorkonzept eine optimale, azimuthale Positionierbarkeit der Injektoren bezüglich der Generatorachse. Diese typische Eigenschaft der Mehrlichtbogensysteme bietet entscheidende Vorteile bei der Pulverbehandlung. Als Ursache hierfür ist zum einen der bereits beschriebene nahezu konstante Plasmafreistrahls zu sehen, zum anderen aber auch die Möglichkeit, den „Cage“-Effekt auszunutzen / 14 /. Dieser Effekt basiert auf den unterschiedlichen Viskositäts- und Geschwindigkeitsbereichen des sich ergebenden Plasmafreistrahls, die bei der Pulvereingabe gezielt genutzt werden (Abb. 10).

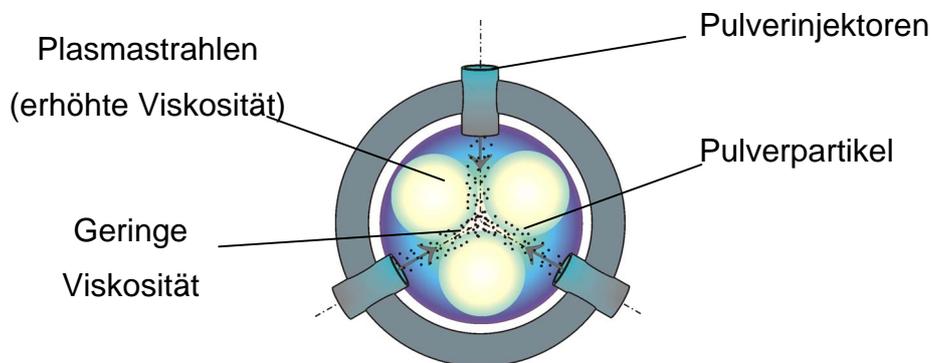


Abb. 10: „Cage“-Effekt für dreifach symmetrische Lichtbogensysteme

Die durch die lange, kaskadiert aufgebaute Düse hervorgerufenen hohen Lichtbogenströmungen ermöglichen den Verzicht auf Molekulgase als Plasmagas. Der Plasmagenerator erzielt bei Strömen bis 600 A Leistungsumsätze im Bereich von 50 kW.

Mittels Computertomografie (Kap. 4.1) konnte gezeigt werden, dass die Winkellage der Dreifachsymmetrie der Plasmafreistrahlen eine deutliche Abhängigkeit bezüglich der Betriebsparameter aufweist. Diese Abhängigkeit ist exemplarisch in Abb. 11 für die Betriebsparameter Stromstärke und Argonfluss dargestellt / 15 /.

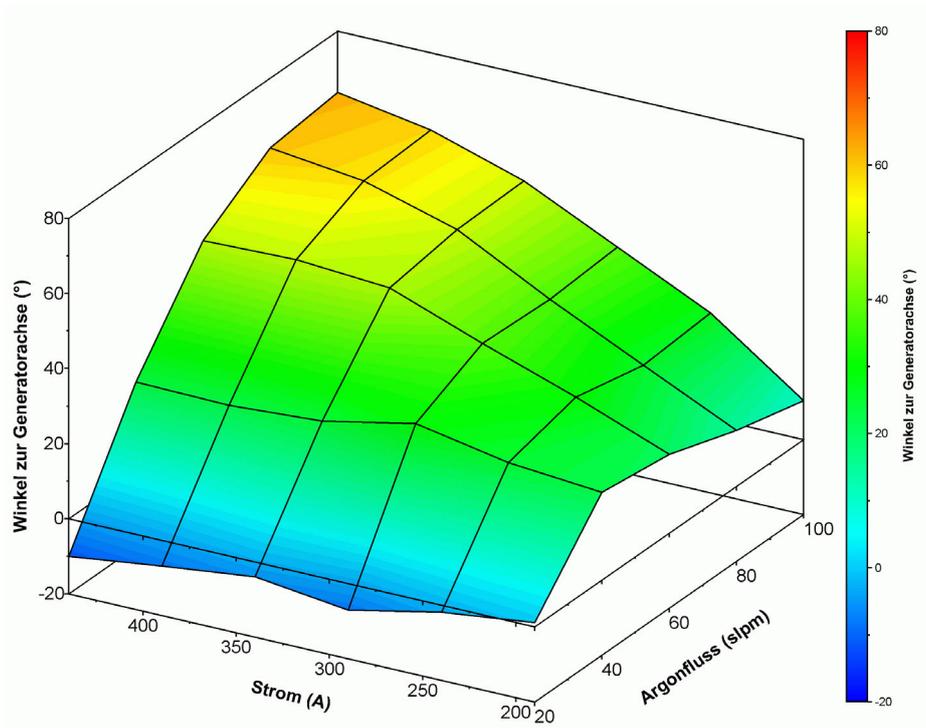


Abb. 11: Parameterabhängige Winkellage der Dreifachsymmetrie des Plasmafreistrahls eines Triplex II Brenners (Düse 9 mm)

3 Entwicklung des Mehranodengenerators „Delta Gun“

Wie im Kapitel 2 beschrieben, zeichnen sich die Mehrlichtbogensysteme gegenüber den Plasmageneratoren mit Einzellichtbogen durch eine homogenere und effektivere Pulverbehandlung aus. Die Tabelle 1 zeigt eine Gegenüberstellung der Parameter Pulverförderrate und Auftragswirkungsgrad (Deposition Efficiency (DE)) für Einzellichtbogen- und Mehrlichtbogengeneratoren am Beispiel der Plasmageneratoren F4 und Triplex. Trotz einer deutlichen Erhöhung der Förderrate kann der Auftragswirkungsgrad durch den Einsatz des Triplex-Systems noch gesteigert werden.

Material	F4		Triplex	
	Förderrate (g/min)	DE (%)	Förderrate (g/min)	DE (%)
Al ₂ O ₃	60	60	150	80
Cr ₂ O ₃	50	45	150	50
Al ₂ O ₃ /13TiO ₂	60	70	150	85
Ni/5Al	80	70	200	90

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Leistungsmerkmale von Einzel- und Mehrlichtbogensystemen am Beispiel der Plasmageneratoren F4 und Triplex (Sulzer Metco / 16 /)

Die dargestellten Werte zeigen das hohe Potential des Triplex-Systems als Vertreter der Mehrkathodengeneratoren. In der Praxis hat sich jedoch herausgestellt, dass die parameterabhängigen Positionsveränderungen der emittierten Plasmastrahlen ein erhebliches Problem bei der Beschichtung bereiten können. Dieses Problem ist durch den Cage-Effekt (vgl. Kap. 2.4.2) begründet, der bei nicht optimierter Injektorposition das Eindringen des Pulvers in den Plasmafreistrahl erschwert. Als Folge verschlechtern sich sowohl der Auftragswirkungsgrad als auch wesentliche Schichteigenschaften (z.B. die Schichthärte).

Der Bedarf an einem Plasmagenerator, der die positiven Eigenschaften der Mehrkathodensysteme wie hohe Standzeiten und gute Homogenität aufweist, jedoch keine Anpassung der Injektorposition an die Betriebsparameter erfordert, war die Motivation für die Entwicklung des Mehranodengenerators „Delta-Gun“.

3.1 Funktionsprinzip

Die parameterunabhängige geometrische Fixierung der anodischen Fußpunkte mehrerer Lichtbögen kann mit einer einzelnen Ringelektrode, die als gemeinsame Anode dient, nicht erreicht werden. Aus diesem Grund besitzt der Plasmagenerator „Delta-Gun“ drei voneinander elektrisch isolierte Anoden, von denen jede je ein Drittel des gesamten Lichtbogenstromes übernimmt. Dieser teilt sich erst im Bereich der Anoden auf und wird bis dahin in einem Einzellichtbogen geführt, der nur einen einzigen kathodischen Bogenfußpunkt besitzt. Es besteht daher nicht die Notwendigkeit von drei, sondern nur von einer Kathode, die zweckmäßigerweise in der Generatorachse angeordnet ist (Abb. 12).

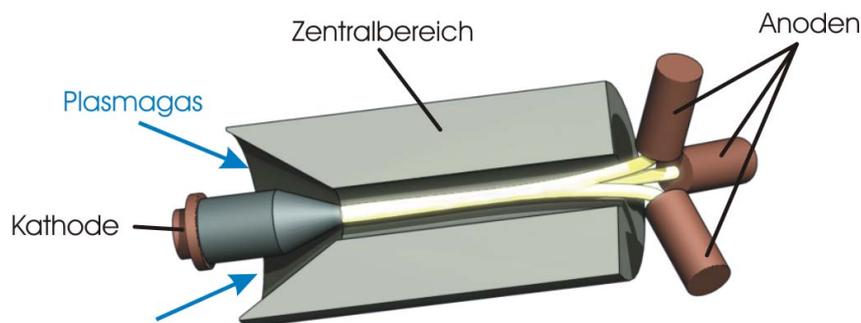


Abb. 12: Prinzipieller Aufbau eines Mehranodensystems

Zwischen der Kathode und den Anoden befindet sich der Zentralbereich, der die Funktion einer strahlformierenden Düse besitzt und mit seiner Länge den Abstand zwischen der Kathode und dem Anodentripel bestimmt. Analog zum Mehrkathodensystem lässt sich so mit der einstellbaren Kathoden-Anoden-Distanz ohne die Verwendung von Molekülgasen eine elektrische Leistung bis zu 50 kW erreichen. Die bei diesem Konzept verwendeten Plasmagase sind die Edelgase Argon und Helium, die im Vergleich zu Molekülgasen hohe Standzeiten der Elektroden ermöglichen.

Die Leistungen von 50 kW werden - bedingt durch den relativ langen Zentralbereich und die sich daraus ergebende hohe Lichtbogenspannung - bereits bei Strömen von 350 bis 400 A erreicht (vgl. Abb. 13).

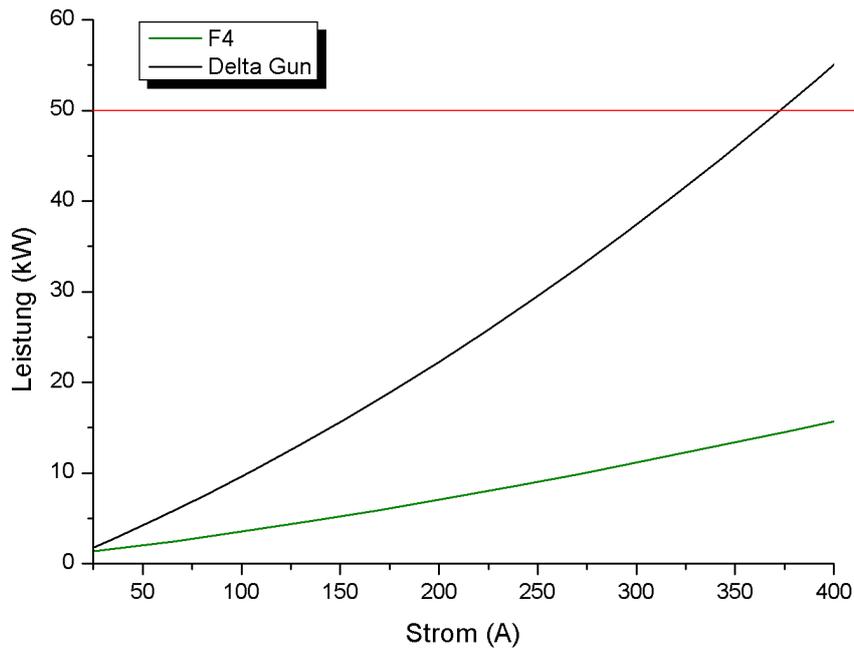


Abb. 13: Stromabhängigkeit der von den Plasmageneratoren F4 und „Delta-Gun“ aufgenommenen elektrischen Leistung (60 slpm Argon)

3.2 Elektrische Beschaltung und Zündung

Zur Stromversorgung des Plasmagenerators „Delta-Gun“ werden drei separate Stromquellen (Abb. 14) eingesetzt. Deren negative Pole sind miteinander und mit der Kathode verbunden, wogegen jeder der positiven Pole je ein Anodensegment kontaktiert / 14 /.

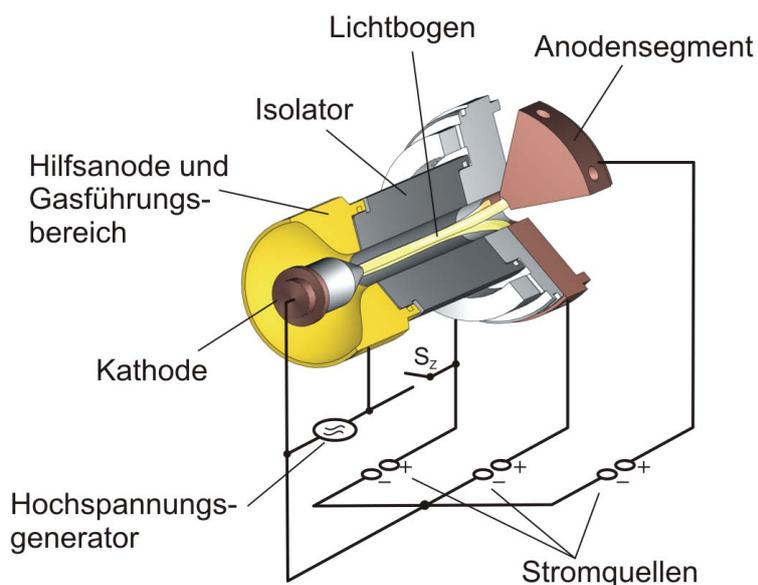


Abb. 14: Schematische Darstellung der elektrischen Beschaltung des „Delta Gun“ mit Zündvorrichtung

Zur Durchführung der Zündung ist der Zentralbereich in einen Isolatorsteil und in eine Hilfsanode, die außerdem zur Gasführung dient, unterteilt. Mittels eines Pilotlichtbogens niedriger Stromstärke zwischen der Kathode und der Hilfsanode wird die Zündung des Plasmagenerators eingeleitet. Dazu wird eines der Anodensegmente über den Leistungsschalter S_Z mit der Hilfsanode verbunden. Bei Anlegen einer Hochspannung von 4 kV zwischen der Kathode und der benachbarten Hilfsanode erfolgt ein elektrischer Überschlag. In dem entstehenden elektrisch leitfähigen Kanal baut sich mit der Spannung der zu diesen Elektroden parallel geschalteten Stromquelle ein kurzer Lichtbogen hoher Stromstärke auf. Durch die hohe Stromstärke dieses Lichtbogens wird eine ausreichend leitfähige Ladungsträgerwolke erzeugt, so dass nach dem Öffnen des Schalters S_Z eine Verlängerung des Lichtbogens bis hin zum Anodensegment erfolgen kann. Wegen der sich damit ausbildenden hohen elektrischen Leitfähigkeit im gesamten Bereich zwischen Kathode und allen Anodensegmenten können auch die beiden anderen, zunächst nicht an der Zündung beteiligten Stromquellen, ihre Ströme einspeisen. Alle drei mit den Anodensegmenten verbundenen Stromquellen tragen dann mit ihren in gleicher Höhe geprägten Teilströmen zum gesamten Lichtbogenstrom bei.

3.3 Betriebsparameter und Kennlinien

Für den Plasmagenerator „Delta-Gun“ werden nur die Edelgase Argon und Helium verwendet. Die typischen Gasflüsse und Ströme sind exemplarisch aus der nachfolgenden Abbildung ersichtlich. Da Argon und Helium das Betriebsverhalten in annähernd gleicher Weise beeinflussen, sind zur besseren Übersichtlichkeit nur Argon- Parameter dargestellt.

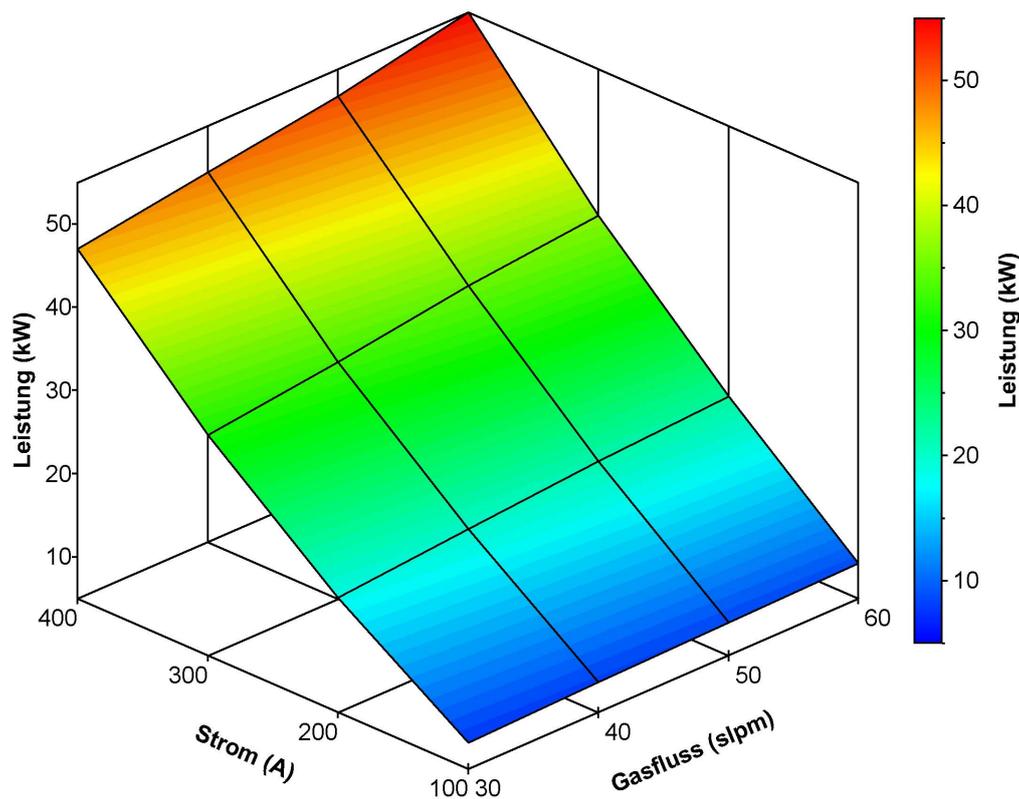


Abb. 15: Elektrische Leistung des Plasmagenerators „Delta-Gun“ in Abhängigkeit von Strom und Plasmagasfluss (Argon, Düse 7mm)

Für den Einsatz im Bereich der thermischen Beschichtung sind Plasmageneratoren ab einer Leistung von 40kW interessant. Wie aus Abb. 15 ersichtlich, erreicht der Plasmagenerator „Delta-Gun“ diese Schwelle (gelber Bereich) bereits unter einem Gesamtstrom von 400 A.

3.4 Potentialverlauf im Inneren der Düse

Als Folge der Anodensegmentierung ergeben sich bei dem Plasmagenerator „Delta-Gun“ Phänomene, die bei konventionellen Plasmageneratoren nicht auftreten. Von besonderem Interesse ist die Ausbildung der drei Lichtbögen, die durch Aufteilung des von der Einzelkathode ausgehenden Gesamtlichtbogens entstehen.

Die geometrischen Randbedingungen eines Plasmagenerators erlauben es nicht, den Innenbereich des Generators mit optischen Methoden zu untersuchen. Hierzu müsste ein Beobachtungskanal durch das gesamte Brennergehäuse, die Wasserkühlung und die Düse geschaffen werden. Da dies nicht möglich ist, muss auf Spannungs- und Potentialmessungen zurückgegriffen werden, die Aufschluss über die im Plasmagenerator auftretenden Wechselwirkungen geben. Diese bestehen zwischen den Lichtbogenfußpunkten und den Lichtbögen einerseits und den Eigenschaften der Kathode, der Anoden und des neutralen Düsenbereichs andererseits.

Die in Abb. 16 dargestellten Messungen der Spannung $U_{KA_{1-3}}$ zwischen den Anoden und der gemeinsamen Kathode zeigen Fluktuationen. Bei konventionellen Einzellichtbogensystemen sind derartige Spannungsschwankungen aufgrund der axialen Bewegungsfreiheit des anodischen Fußpunktes bekannt / 10 /. Im Falle des Plasmagenerators „Delta-Gun“ beträgt die axiale Längenausdehnung der Anodensegmente 8 mm. Da in Argonatmosphäre die längenspezifische Lichtbogen-Spannung ca. 1 V/mm beträgt, würde für einen punktuell ansetzenden und über die gesamte Anodenlänge sich bewegenden Lichtbogenfußpunkt die Lichtbogenverlängerung zu einer Spannungserhöhung von bis zu 8 V führen. Wie aus der Literatur bekannt ist, besitzt jedoch der anodische Ansatzpunkt in Edelgasatmosphäre bei Strömen im Bereich von ca. 200...400 A eine lokale Ausdehnung von ca. 2 mm². Damit reduziert sich die durch eine axiale Fußpunktsbewegung hervorgerufene Amplitude der Fluktuationsspannung auf ca. 5 V. Da die gemessenen Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ jedoch Schwankungsamplituden bis zu 13 V aufweisen, kann eine axiale anodische Fußpunktsbewegung nicht als alleinige Begründung der Fluktuationen herangezogen werden.

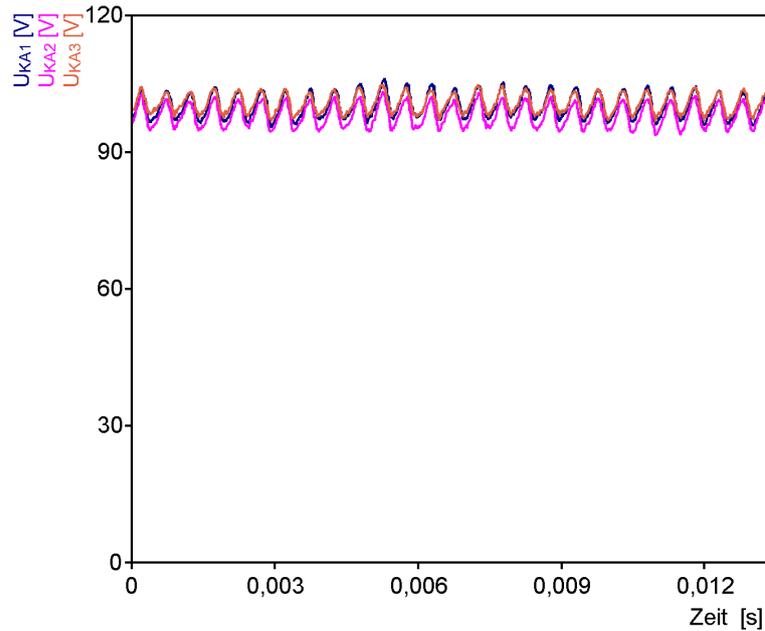


Abb. 16: Zeitverlauf der Teilspannungen $U_{KA_{1-3}}$ zwischen Kathode und Anoden beim Plasmagenerator „Delta-Gun“ (Plasmagas: 40 slpm Ar, Strom: 200 A)

Als Erklärung dieses Phänomens wird die Wanderung des Verteilungspunktes der zentralen Lichtbogensäule betrachtet (Abb. 17). Dieser vollzieht ebenfalls axiale Bewegungen und verändert somit die Bedingungen innerhalb der zentralen Lichtbogensäule und der sich anschließenden drei kurzen, anodischen Teillichtbögen.

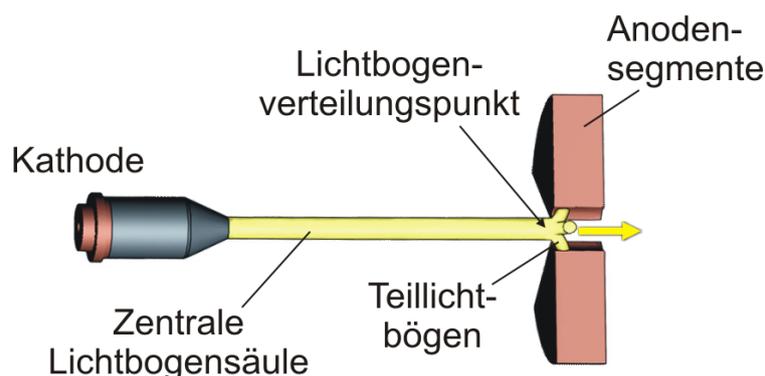


Abb. 17: Schematische Darstellung der Lichtbogenverteilung des Plasmagenerators „Delta-Gun“

Diese Veränderungen wirken sich zeitgleich auf alle drei Teillichtbögen aus und ergeben die in Phase und Amplitude übereinstimmenden Spannungsverläufe (Abb. 18). Da die Phasengleichheit derart deutlich in Erscheinung tritt, kann

zusätzlich angenommen werden, dass der Verteilungspunkt in unmittelbare Nähe der Anoden liegt.

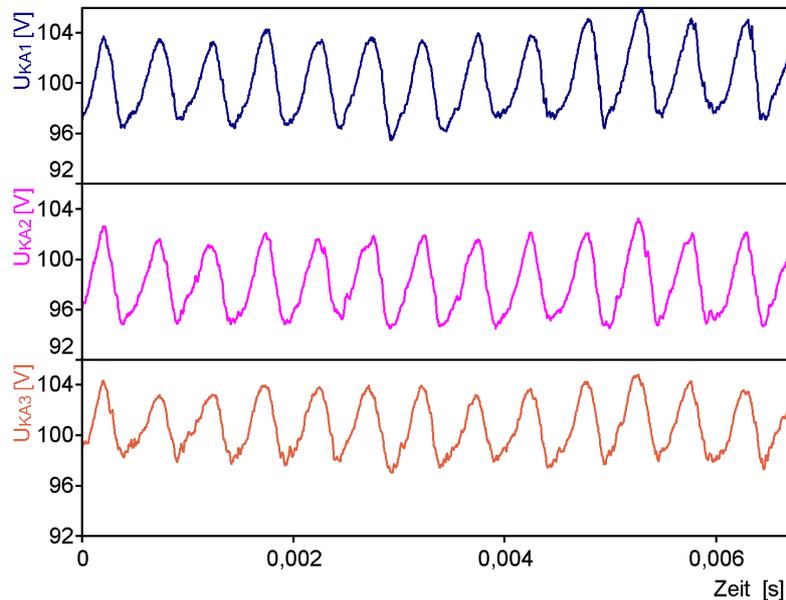


Abb. 18: Fluktuationen der Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ zwischen Kathode und Anoden

Zur genaueren Untersuchung der Spannungsfuktuationen $U_{KA_{1-3}}$ zwischen Kathode und Anoden wird die in Abb. 19 dargestellte elektrische Beschaltung zur Potentialmessung vorgenommen.

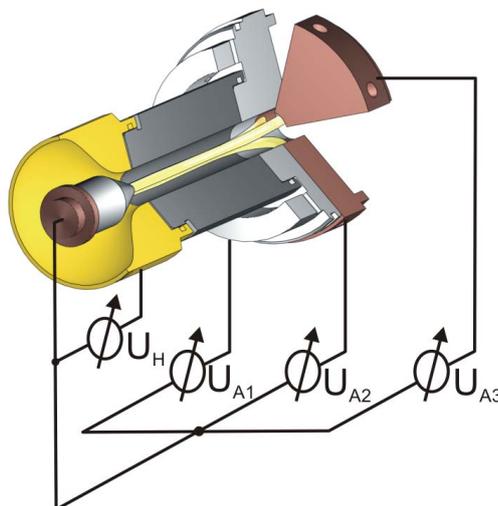


Abb. 19: Beschaltung der Elektroden zur Durchführung der Potentialmessung

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wird der Plasmagenerator „Delta-Gun“ mittels eines Pilotlichtbogens zwischen der Kathode und der Hilfsanode gezündet. Wenn nach erfolgter Zündung die dazu erforderliche elektrische Kontaktierung der

Hilfsanode vom Zündkreis getrennt ist, kann die Hilfsanode als Messsonde zur Potentialmessung verwendet werden. Die Hilfsanode nimmt im Betrieb das sogenannte Floatingpotential V_F an, das geringfügig unter dem Plasmapotential V_P des Lichtbogens liegt. Als Ursache für die Potentialdifferenz $V_P - V_F$ sind die Elektronen zu nennen, die aufgrund ihrer geringen Masse m_e und der sich daraus ergebenden höheren mittleren thermischen Geschwindigkeit in größerer Zahl als die positiven Ionen mit der Ionenmasse m_i auf der Hilfsanode auftreffen. Die dadurch negativ aufgeladene Oberfläche wird durch eine positive Raumladungsschicht (Plasmagrenzschicht) abgeschirmt, deren Betrag sich aus dem Potentialabfall in der Vorschicht und in der Raumladungsschicht ergibt (Formel 3-1).

$$V_F = V_P - \frac{kT_e}{2e} \left(1 + \ln \left(\frac{m_i}{2\pi m_e} \right) \right) \quad (3-1)$$

Die gemessene Spannung U_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode ergibt sich aus deren Potentialdifferenz $U_{KH} = V_K - V_F$. Da die Hilfsanode in Höhe der Kathodenspitze abschließt, spiegelt ihre Potentialdifferenz zur Kathode im wesentlichen den Kathodenfall wider. Die Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ beinhalten dagegen den gesamten Potentialabfall über die Lichtbogensäule sowie über den Kathoden- und den Anodenfall. Abb. 20 zeigt die gemessenen Spannungen U_{KH} und $U_{KA_{1-3}}$ für den „Delta-Gun“ Generator bei einem Strom von 200 A und einem Plasmagasfluss von 20 slpm Argon.

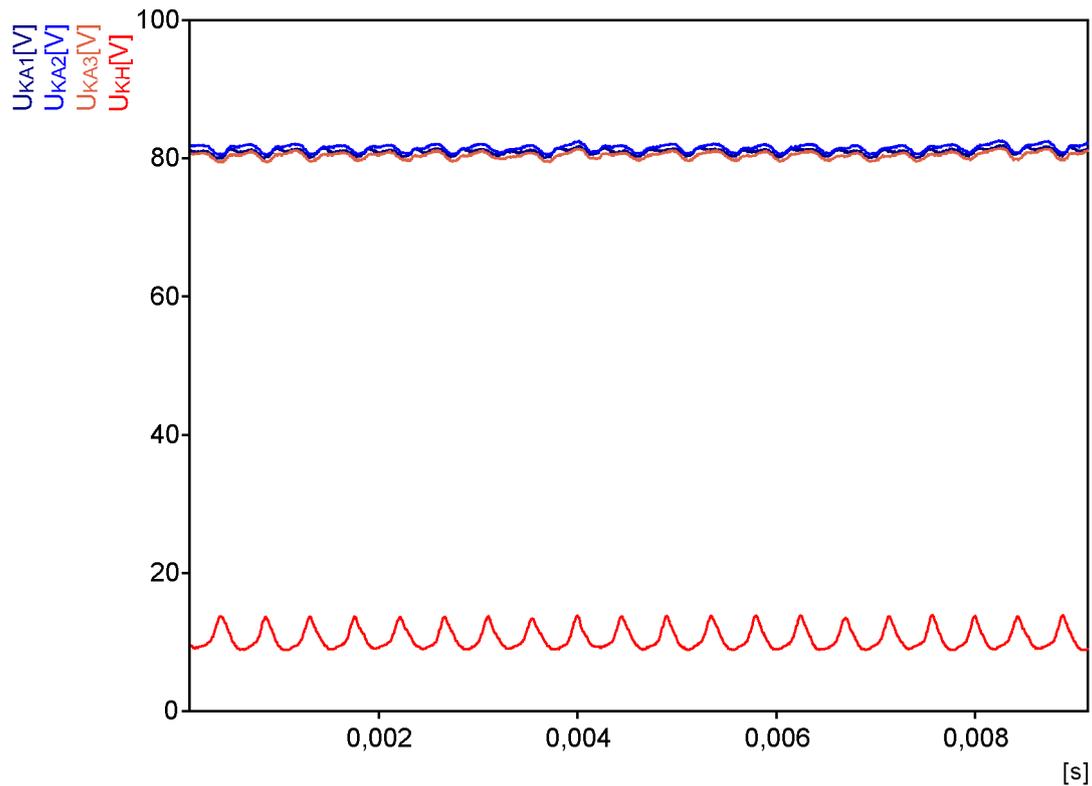


Abb. 20: Zeitverläufe der Kathoden – Anoden Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ und der Spannung U_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode bei dem Plasmagenerator „Delta-Gun“ (200 A, 20 slpm Ar)

Wie bei den Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ treten auch bei der Spannung U_{KH} Fluktuationen mit einer Frequenz von ca. 2 kHz auf. Betrachtet man die Spannung U_{KH} in Abhängigkeit des Plasmagasflusses, so zeigt sich der in Abb. 21 dargestellte Zusammenhang. Die blaue Linie gibt den Mittelwert $\langle U_{KH} \rangle$ der Spannung und die roten Linien geben die Minima $U_{KH_{min}}$ und Maxima $U_{KH_{max}}$ des Spannungssignals für die entsprechenden Plasmagasflüsse wider. Es ist festzustellen, dass die Maximalamplitude $U_{KH_{max}}$ geringfügig mit steigendem Plasmagasfluss zunimmt, während die Minimalamplitude $U_{KH_{min}}$ und dementsprechend auch der Mittelwert $\langle U_{KH} \rangle$ annähernd konstant bleiben.

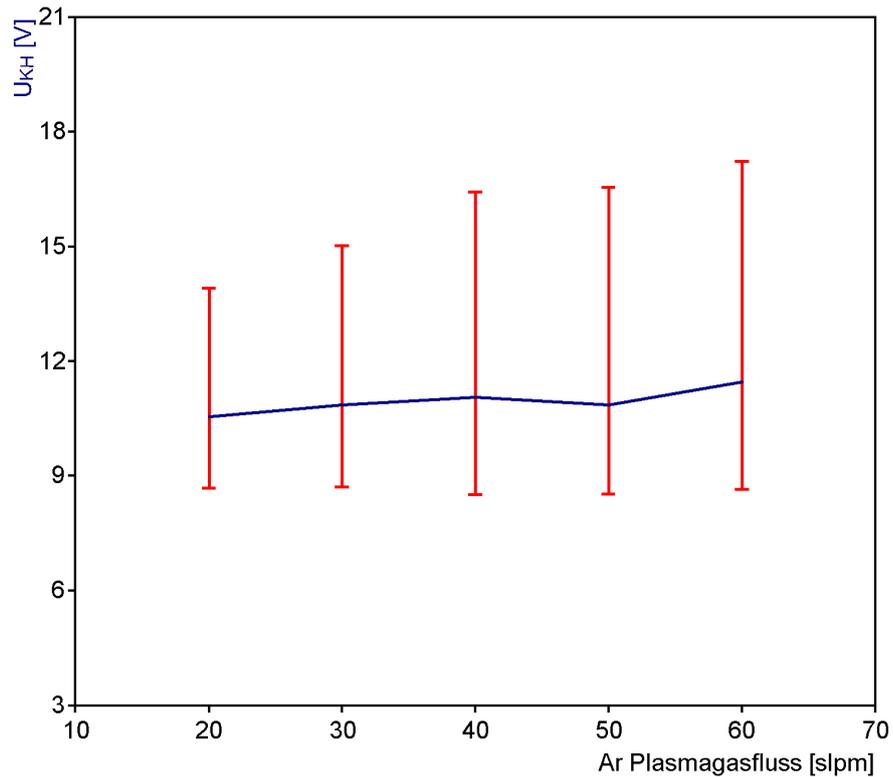


Abb. 21: Mittelwert (blau) und Schwankungsbreite (rot) der Spannung U_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode in Abhängigkeit des Plasmagasflusses ($I = 200$ A)

Zur Überprüfung, ob dieses Phänomen ursächlich als Kathodeneffekt zu sehen ist, wurden verschiedenartig geformte Kathoden eingesetzt (Abb. 22).



Abb. 22: Verschiedene Kathodenformen zur Überprüfung der Spannungsschwankungen ΔU_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode

Trotz unterschiedlicher Bauformen der Kathoden verändern sich die gemessenen Verläufe der Spannungen U_{KH} und $U_{KA_{1-3}}$ nicht signifikant. Daher wird als Ursache für die Spannungsschwankungen kein Kathodenphänomen, sondern der X-Pinch Effekt / 17 / in der zentralen Lichtbogensäule betrachtet. Dabei handelt es

sich um eine zufällig auftretende zunächst minimale lokale Einschnürung oder auch Verengung des Lichtbogens, die in Folge zu einem stärkeren Pinchdruck und damit zu einer noch stärkeren Einschnürung des Lichtbogens führt (Abb. 23).

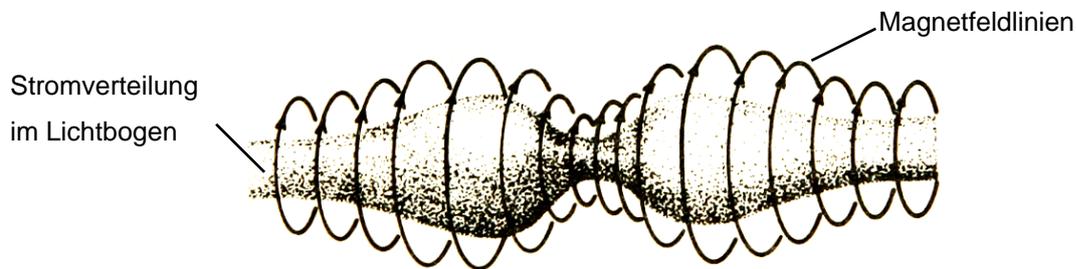


Abb. 23: X-Pinch Effekt der Lichtbogensäule

Diese Erscheinung kann entlang der Lichtbogensäule in periodischen Abständen ausgehend von der Kathode bis zu den Anodensegmenten auftreten. Untersucht man die Spannung $U_{KA_{1-3}}$ zwischen Kathode und den Anodensegmenten in Abhängigkeit vom Plasmagasfluss, so ergibt sich der in Abb. 24 dargestellte Verlauf. Aufgrund der übereinstimmenden Signalverläufe zwischen $U_{KA_{1-3}}$ wird zur besseren Übersicht nur U_{KA_1} , im Folgenden allgemein U_{KA} genannt, gezeigt.

Mit Erhöhung des Gasflusses nehmen sowohl der Mittelwert $\langle U_{KH} \rangle$ als auch die Schwankungen ΔU_{KH} deutlich zu. Die Zunahme des Mittelwertes $\langle U_{KH} \rangle$ beruht auf der Abkühlung des Lichtbogens durch den gesteigerten Gasfluss, wodurch die Leitfähigkeit des Lichtbogens sinkt.

Es wird daher angenommen, dass die durch den X-Pinch Effekt ausgelösten Störungen den Verteilungspunkt des Plasmalichtbogens zum Oszillieren bringen und dadurch die beobachteten Spannungsfluktuationen hervorrufen.

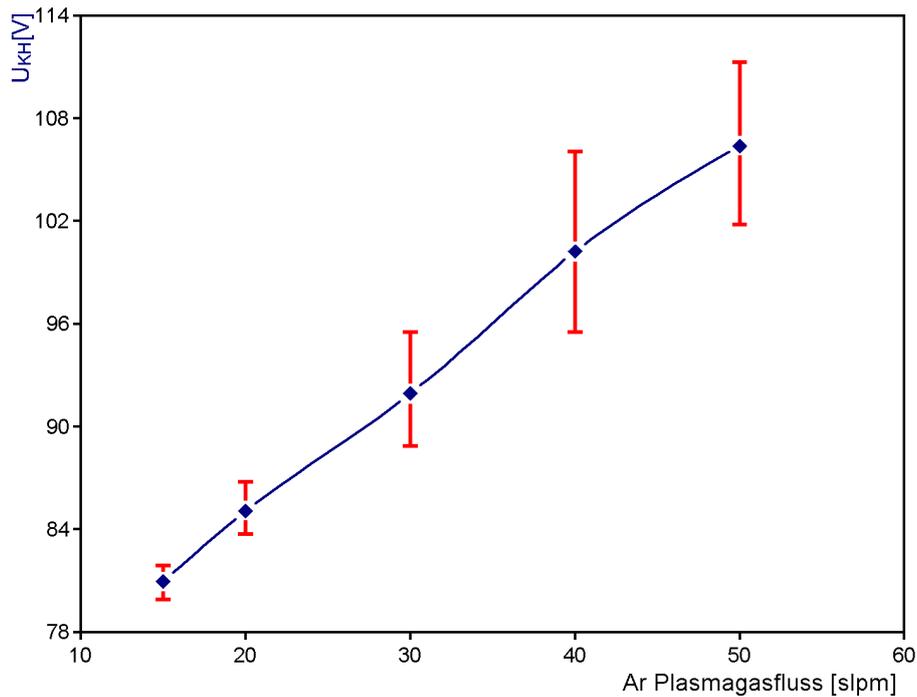


Abb. 24: Spannung U_{KA} zwischen Kathode und Anodensegmenten in Abhängigkeit vom Plasmagasfluss (Parameter $I = 200$ A)

Bei einem konstanten Plasmagasfluss von 20 slpm Argon fällt bei den Spannungssignalen auf, dass die maximale Amplitudendifferenz ΔU_{KH} zwischen der Kathode und der Hilfsanode größer sind als die Fluktuationen ΔU_{KA} zwischen Kathode und Anode. Eine mögliche Erklärung liegt in der Messung des Floatingpotential V_F . Die durch den X-Pinch ausgelösten Fluktuationen führen zu einer Annäherung des Lichtbogens an die Wandung der elektrisch isolierten Hilfsanode und damit zu einer Auslenkung aus Symmetrieachse des Generators. Daraus resultiert ein verminderter bzw. erhöhter Messwert für die Spannung U_{KH} .

3.5 Thermische Belastung der Anodensegmente

Die Umsetzung elektrischer Leistungen bis zu 50 kW erfordert für einen stationären Betrieb eine ausreichende Kühlung der Elektroden. Die konstruktiven Einschränkungen (bedingt durch die Anodensegmentierung) erlauben kein serielles Kühlkonzept, wie es bei konventionellen Generatoren Verwendung findet. Bei einem seriellen Kühlkonzept strömt das gesamte Kühlwasser zunächst durch die Anode als dem am meisten belasteten Bauteil bevor es nach Durchströmen des Zentralbereichs der Kathode zugeführt wird / 18 /. Für eine gleichmäßige Stromaufteilung und eine dementsprechende gleichmäßige Plasmastrahlgenerierung müssen die drei Anodensegmente des Mehranodengenerators „Delta-Gun“ für die anodischen Bogenfußpunkte möglichst identische Bedingungen aufweisen. Diese Vorgabe lässt sich nur mittels einer parallelen Kühlung der Anodensegmente realisieren. Damit reduziert sich der für jedes Anodensegment zur Verfügung stehende Kühlwasserfluss \dot{m}_{KS} auf ein Drittel des gesamten Kühlwasserflusses \dot{m}_G . Der Leistungsumsatz P_{KS} an einem Anodensegment wurde experimentell aus der Temperaturerhöhung ΔT_{KS} des Kühlwassers nach Durchströmen des Anodensegments ermittelt. Mit der spezifischen Wärme c_{p_w} des Wassers gilt:

$$P_{KS} = \dot{m}_{KS} \cdot \Delta T_{KS} \cdot c_{p_w} = \frac{1}{3} \cdot \dot{m}_G \cdot \Delta T_{KS} \cdot c_{p_w} \quad (3-2)$$

In Abb. 25 ist der Leistungsumsatz P_{KS} für eine Generatorleistung bis 50 kW dargestellt.

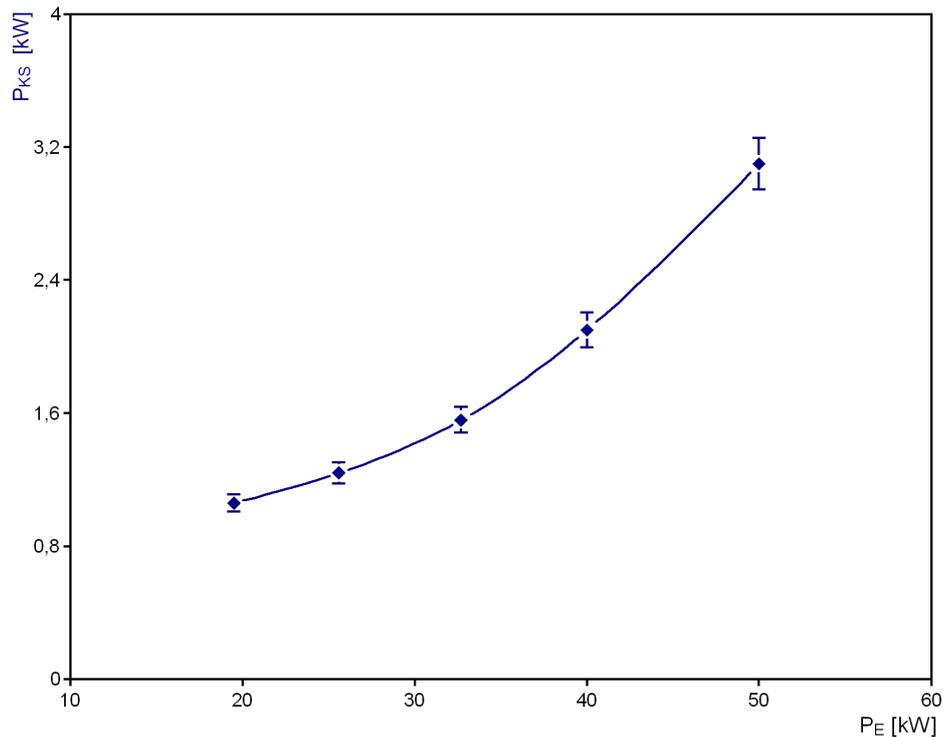


Abb. 25: Anfallende Kühlleistung P_{KS} eines Anodensegmentes in Abhängigkeit von der elektrische Leistung P_E (Parameter: Plasmagas 50 slpm Ar)

Bezogen auf die gesamte Kühlleistung P_{KG} des Plasmagenerators ergibt sich für die Anoden ein vom Düsendurchmesser abhängiger Anteil:

$$p_A = \frac{3 \cdot P_{KS}}{P_{KG}} \approx 25-30 \% \quad (3-3)$$

Für Einzellichtbogensysteme wird in der Literatur / 18 / ein Anteil $p_A \approx 80-90\%$ angegeben. Der deutliche Unterschied zwischen diesen Werten beruht darauf, dass bei Einzellichtbogensystemen die Anode konstruktionsbedingt mit der Düse identisch ist, während sie beim Plasmagenerator „Delta-Gun“ ein eigenes Brennelement darstellt.

3.6 Kathodentemperaturmessung

Die Schnellwechsel-Kathode (Kap. 3.7.4) des Generators „Delta-Gun“ hat keinen direkten Kontakt zum Kühlwasser. Dadurch ist es möglich die Kathodenhalterung mit einer Messbohrung (Abb. 26) zu versehen, die von der Generatorrückseite bis an die Kathodenspitze reicht.

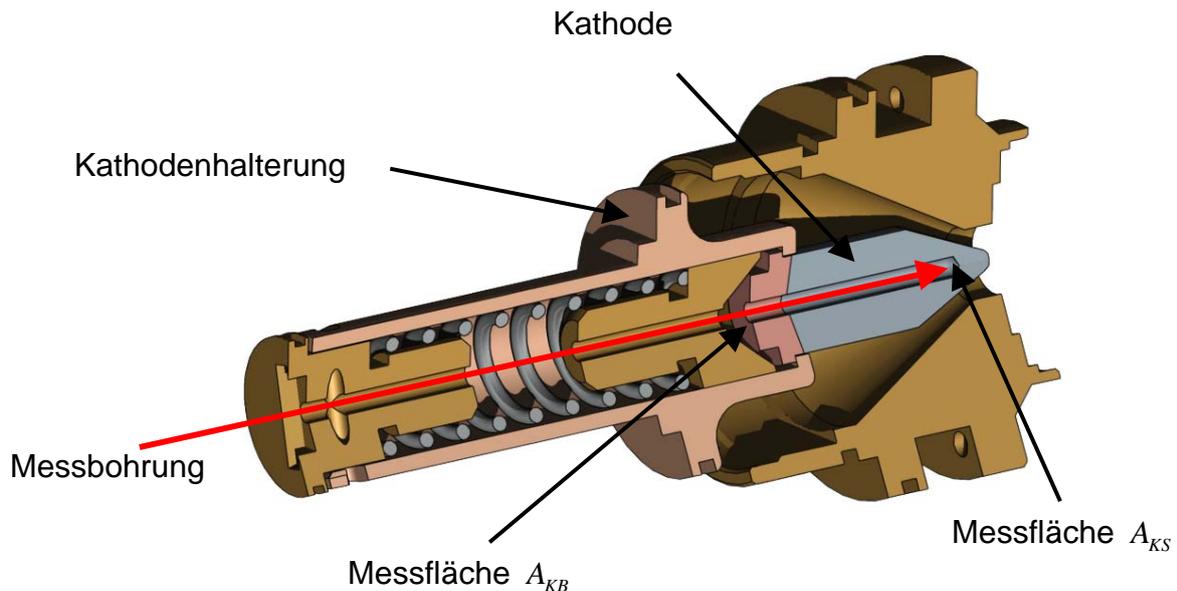


Abb. 26: Kathode und Kathodenhalterung mit Messbohrung

Die Temperatur der Messfläche A_{KS} nahe der Kathodenspitze wird bei laufendem Betrieb des Generators durch die Messbohrung hindurch mit einer Infrarotkamera des Typs VarioTHERM™ der Firma Jenoptik gemessen. Das Objektiv der Kamera, die für den Spektralbereich von 3,4 – 5 μm ausgelegt ist, fokussiert die Messfläche A_{KS} auf ein Detektor-Array mit 256x256 Platin-Silizid Elementen. Temperaturen zwischen $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ können mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ gemessen werden. Ein mit diesem Kamerasystem aufgenommenes typisches Temperaturprofil $\overline{T_{KS}}$ ist in Abb. 27 dargestellt.

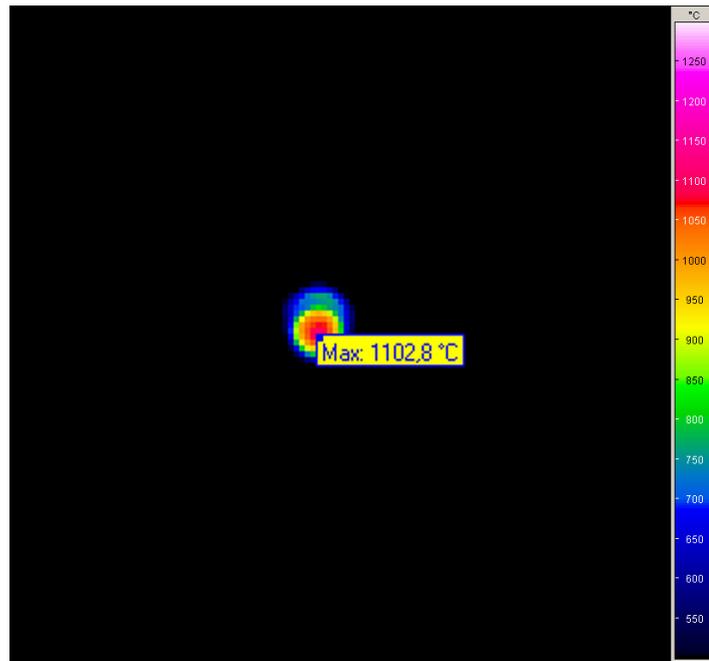


Abb. 27: Temperaturverteilung $\overline{\overline{T}}_{KS}$ der Messfläche A_{KS} in Nähe der Kathodenspitze

Analog wie für die Bestimmung der Temperaturen $\overline{\overline{T}}_{KS}$ beschrieben, können bei einer Kathode ohne Messbohrung die Temperaturen $\overline{\overline{T}}_{KB}$ an der Messfläche A_{KB} gemessen werden. Von den Temperaturverteilungen $\overline{\overline{T}}_{KS}$ und $\overline{\overline{T}}_{KB}$ werden die Maximalwerte \hat{T}_{KS} und \hat{T}_{KB} gebildet und in Abhängigkeit vom Betriebsstrom in Abb. 28 dargestellt.

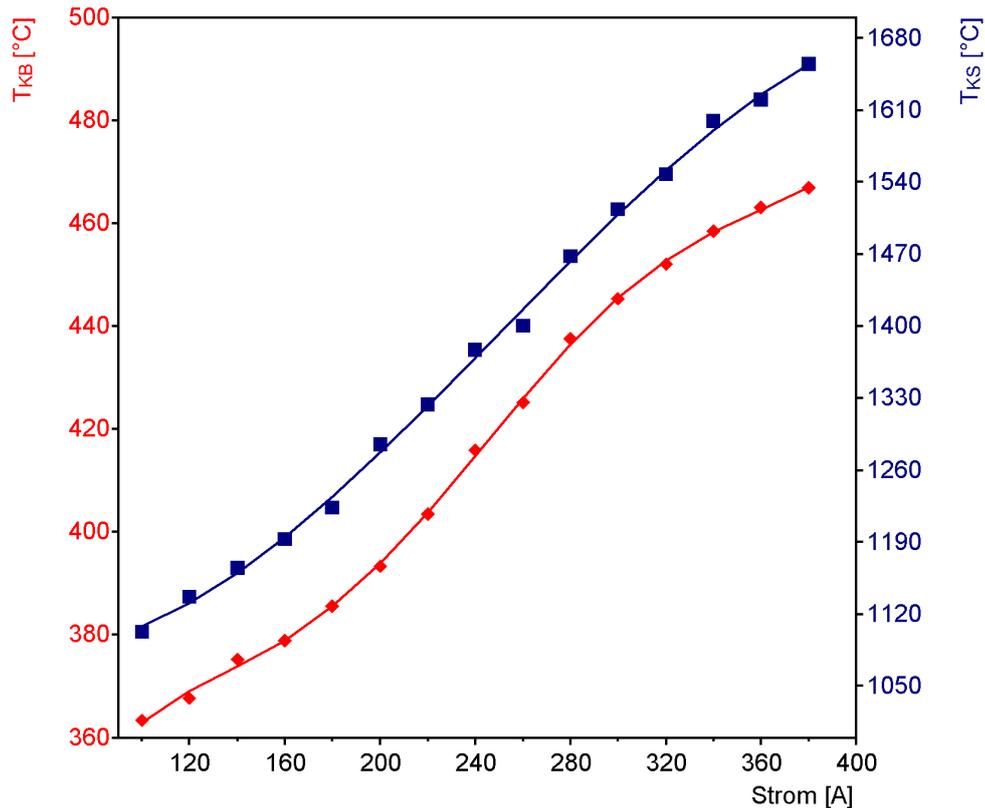


Abb. 28: Maximale Temperaturen \hat{T}_{KS} und \hat{T}_{KB} der Messflächen A_{KS} und A_{KB} als Funktion des Betriebsstromes

Unter der Annahme, dass die Wärmeleitwerte der angebohrten Kathode und der nichtangebohrten Kathode übereinstimmen, lässt sich der Wärmestrom Φ bestimmen zu:

$$\Phi = \frac{\lambda_w \cdot A \cdot \Delta T}{l} \quad (3-4)$$

Für die Abschätzung wurde eine Wärmeleitfähigkeit von Wolfram (bei 1000 °C) von $\lambda_w = 114 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, eine Querschnittsfläche $A = r^2\pi = 74 \text{ mm}^2$ und eine Länge $l = 22,2 \text{ mm}$ der zylindrischen Kathode angenommen.

Die Temperaturdifferenz ΔT wurde für unterschiedliche Ströme I gemessen und daraus der Wärmestrom Φ berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 29 dargestellt.

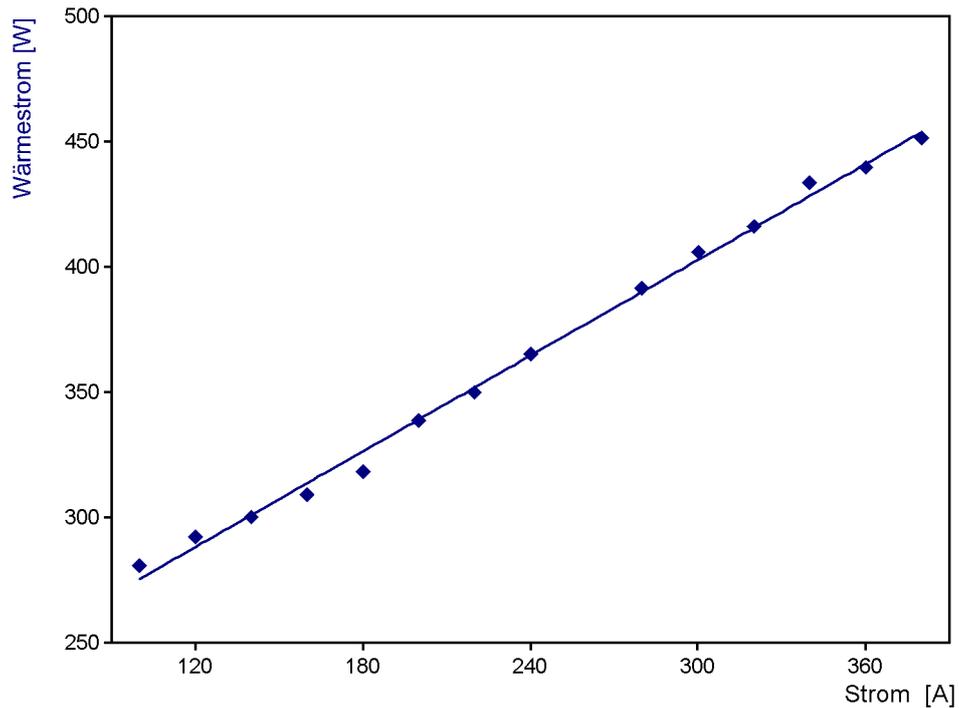


Abb. 29: Wärmestrom Φ der Kathode als Funktion des Generatorstroms I

Neben dem ermittelten Wärmestrom Φ lässt sich der Temperaturhaushalt der Kathoden auch über ihr optisches Erscheinungsbild qualifizieren. Die in Abb. 30 dargestellten Aufnahmen zeigen das typische Abbild einer Kathodenspitze nach einer Betriebsdauer von 50 Stunden und einer mittleren Leistung von 40 kW.

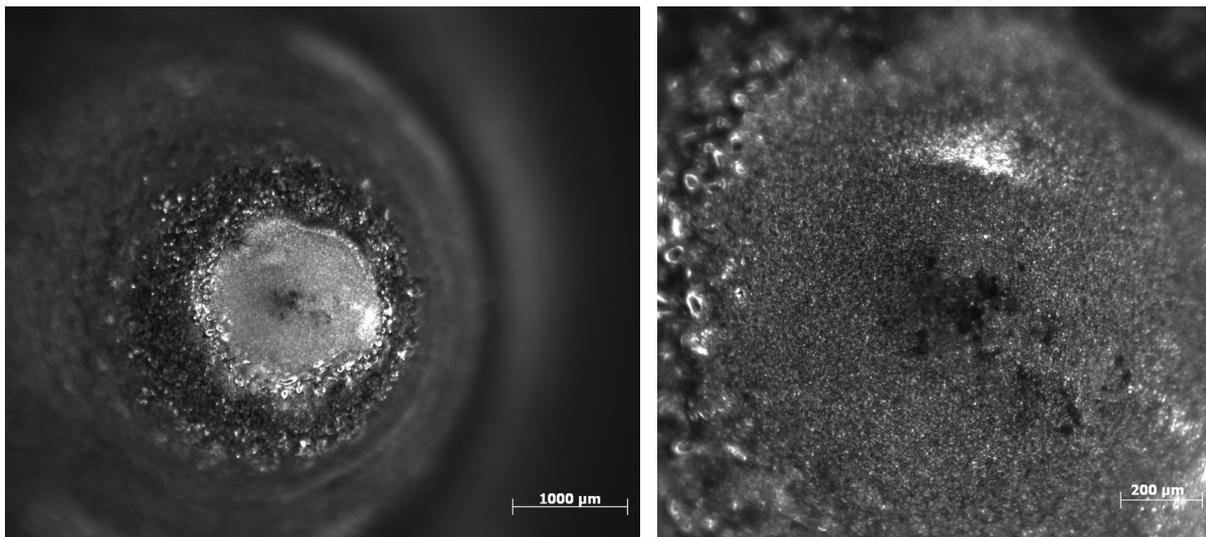


Abb. 30: Mikroskopaufnahmen der „Delta-Gun“- Kathode nach 50 Betriebsstunden bei einer Brennerleistung von 40 kW

Vergleichend dazu ist in Abb. 31 das Bild einer Kathodenspitze eines konventionellen Brenners, ebenfalls nach 50 Betriebsstunden dargestellt.

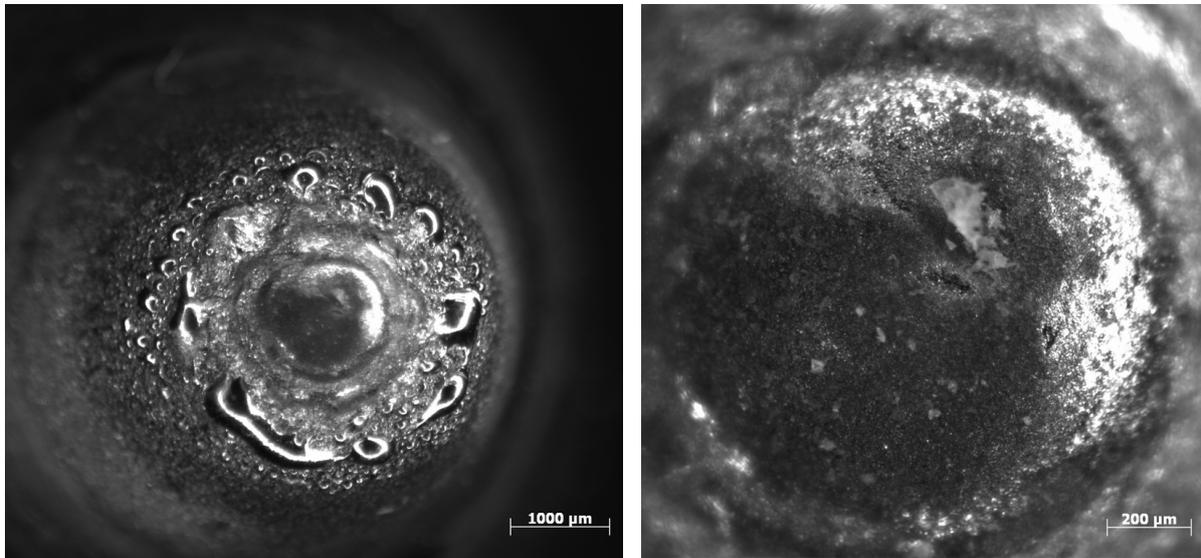


Abb. 31: Mikroskopaufnahmen einer „F4“- Kathode nach 50 Betriebsstunden bei einer Brennerleistung von 40 kW

Die Ähnlichkeiten der Abb. 30 und Abb. 31 macht deutlich, dass das beim „Delta-Gun“ realisierte Prinzip der Kontaktkühlung (Kap. 3.7.4) ausreicht, um auch dem Dauereinsatz gerecht zu werden / 19 / , / 20 / .

3.7 Konstruktive Merkmale des Plasmagenerators Delta-Gun

Bei den Mehrlichtbögen-Plasmageneratoren, die seit mehreren Jahren in verstärktem Umfang in Forschungsinstituten entwickelt werden und in der Industrie im Einsatz sind, erfolgt die Lichtbogenaufteilung im Kathodenbereich. Die wichtigsten Vertreter der Mehrlichtbogen-Plasmageneratoren sind beispielsweise die Dreikathoden Plasmageneratoren der Typen Triplex (SulzerMetco), Magnum K3 (GTV mbH) oder Axial III (Mettech).

Im Gegensatz zur Lichtbogenaufteilung im Kathodenbereich, wie sie bei den bisher existierenden Mehrlichtbogen-Systemen stattfindet, stellt die Aufteilung der Lichtbögen im Anodenbereich ein völlig neuartiges Konzept dar und erfordert eine eigenständige Entwicklung. Diese bietet jedoch die Möglichkeit, Erfahrungen und Probleme, die aus der Praxis der Mehrlichtbogen-Systeme bekannt geworden sind, aufzugreifen und bei der Konstruktion zu berücksichtigen. Hierunter ist beispielsweise der Aufwand bei Auswechslung generatortypischer Verschleißteile zu sehen. Ein Austausch solcher Verschleißteile (z.B. Elektroden) führen dabei in der Industrie meist zu einem Produktionsausfall mit nicht unerheblichem Zeitverlust, der sich aus einer Reihe verschiedener Arbeitsschritte ergibt (Ausbau des Generators aus dem laufenden Beschichtungsprozess, das Zerlegen des Generators, der Tausch der Elektroden, der anschließende Zusammenbau mit Dichtigkeitsprüfung, der Rückbau in die Beschichtungsanlage, die abschließende Montage und Ausrichtung der Pulverinjektoren).

Um hier eine deutliche Verbesserung zur Reduzierung des Aufwands und zur Minimierung der Ausfallzeiten zu erreichen, bieten sich prinzipiell zwei verschiedene Wege an:

- Erhöhung der Generatorstandzeiten durch verbesserte Konstruktion und Funktion des Plasmagenerators
- Ermöglichung eines einfachen und schnellen Wechsels der Verschleißteile durch konstruktive Maßnahmen

Beide Vorgehensweisen werden im Konzept des Generators „Delta-Gun“ umgesetzt und in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

3.7.1 Generatorstandzeiten

Das Mehranodenkonzept ermöglicht auch bei hohen Leistungsumsätzen von 50 kW lange Standzeiten von ca. 100 Betriebsstunden. Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben liegt dies vor allem am 50mm langen zylindrischen neutralen Düsenbereich zwischen der Kathode und den Anoden. Vergleichbar zu ähnlichen Generatorkonzepten (z.B. Triplex, K3) ist es damit möglich auf generatorbelastende Molekülgase zu verzichten und dennoch aufgrund der sich ergebenden hohen Spannung den geforderten Leistungsbereich mit Strömen im Bereich von 400 A zu erreichen.

Zusätzlich kann die lokale thermische Belastung der drei Anodensegmente durch die Drittelung des Betriebsstroms erheblich reduziert werden (vgl. Kapitel 3.5).

3.7.2 Kühlprinzip

Sowohl bei konventionellen, wie auch bei Mehrkathoden- Generatorkonzepten wird das Kühlwasser zunächst der einteiligen Anode zugeführt. Somit steht dem thermisch am höchsten belasteten Bauteil das gesamte Kühlwasser zur Verfügung. Anschließend wird der Kühlwasserstrom je nach Generatorkonzept auf die verschiedenen nachfolgenden Baugruppen wie z.B. auf die drei Kathoden aufgeteilt, so dass in diesem Fall pro Baugruppe nur noch etwa ein Drittel des Kühlwassers genutzt wird. Da diese Baugruppen thermisch nur gering belastet sind, reicht für sie die reduzierte Kühlwassermenge für einen dauerhaften Betrieb aus.

Da sich die Konstruktion des Mehranodengenerators, bedingt durch die drei separaten Anodensegmente, von allen bisherigen Brennerkonzepten unterscheidet, muss auch das Kühlkonzept geeignet angepasst werden. Zusätzlich gilt es zu berücksichtigen, dass die Stromzuführung zu den Anodensegmenten aus sicherheitstechnischen Gründen in das Innere des Generators verlegt werden muss. Eine Kombination dieser beiden Funktionalitäten aus Strom- und Wasserführung ermöglicht einen platzsparenden und sicheren Aufbau. Dazu wird der Kühlwasserstrom bereits in der Stromquelle gedrittelt und mittels wassergekühlter Stromkabel dem Generator zugeführt. Im Inneren des Generators übernehmen

Messingrohre die Doppelfunktion, jeweils kombiniert Strom und Kühlwasser den Anodensegmenten zuzuführen (vgl. Abb. 32).

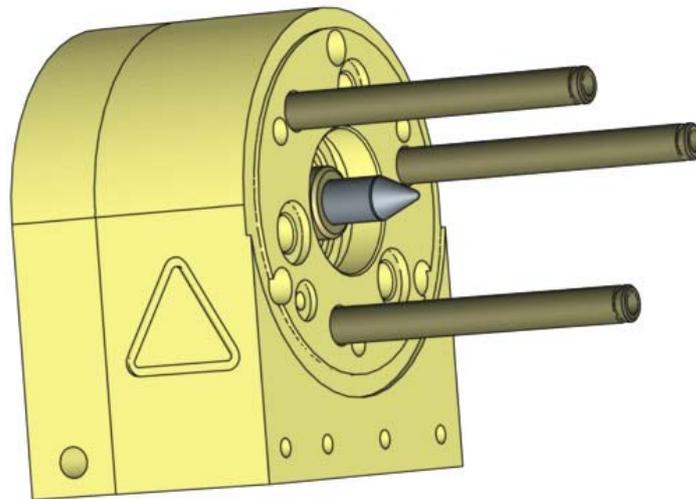


Abb. 32: Messingrohre kombinieren Strom- und Wasserführung im Inneren des „Delta-Gun“ Generators

Nach Kühlung der Anodensegmente wird der aufgeteilte Wasserstrom wieder zusammengefasst, durchströmt alle nachfolgenden Baugruppen und wird schließlich über ein kombiniertes Strom-Wasserkabel abgeleitet.

3.7.3 Schnellwechseldüse

Die Zielsetzung eines einfachen und schnellen Wechsels der verschleißempfindlichen Elektroden (Anodensegmente und Kathode) erfordert im Fall der Anodensegmente aufgrund der Vielzahl von Einzelteilen einen Aufbau in Form einer kompletten Baugruppe (Abb. 33). Diese bildet eine kompakte Düseneinheit und beinhaltet die drei Anodensegmente, den Neutrodenbereich, den Gasverteiler und die gesamte Kühlwasser- und Stromführung im vorderen Bereich des Generators. Die komplette Düseneinheit kann dem Generator entnommen werden und als ganze Baugruppe oder in Einzelteilen ersetzt werden.

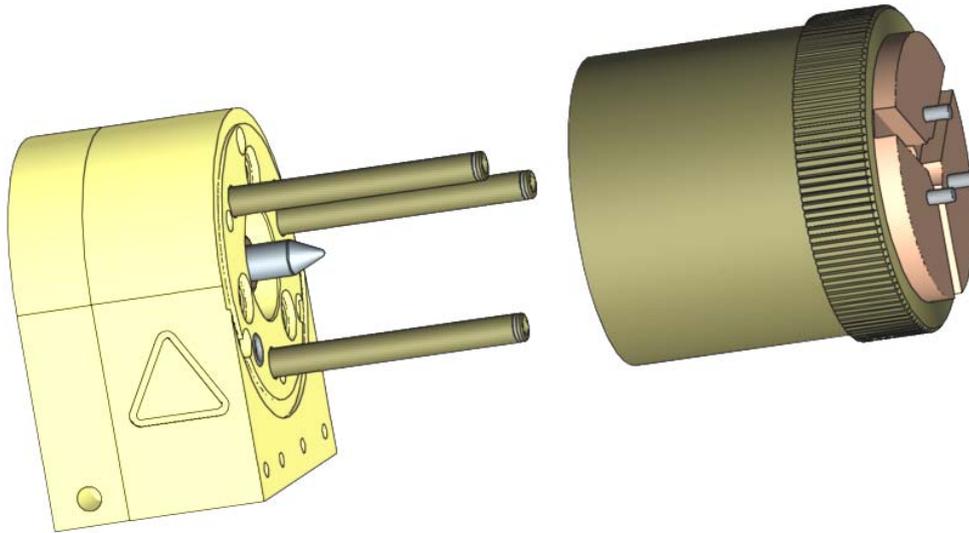


Abb. 33: Auswechseln der Düseneinheit beim „Delta-Gun“

3.7.4 Schnellwechselkathode

Basierend auf den Ergebnissen aus Kap. 3.6 konnte für die Kathode eine indirekte Kühlung verwendet werden. Hierbei wird die Kathode nicht selbst mit dem Kühlwasser durchströmt, sondern steht nur über eine Kontaktfläche in Verbindung zu einem wassergekühlten Bauteil, das die abzuführende Wärme von der Kathode aufnimmt und in das Kühlwasser ableitet. Die mit Bajonettverschraubung und Feder fixierte Kathode (Abb. 34) kann ohne Öffnung des Kühlwasserkreislaufes ausgetauscht werden. Dieses Konstruktionsprinzip ermöglicht den für die industrielle Praxis wichtigen Vorteil eines schnellen Kathodenwechsels.

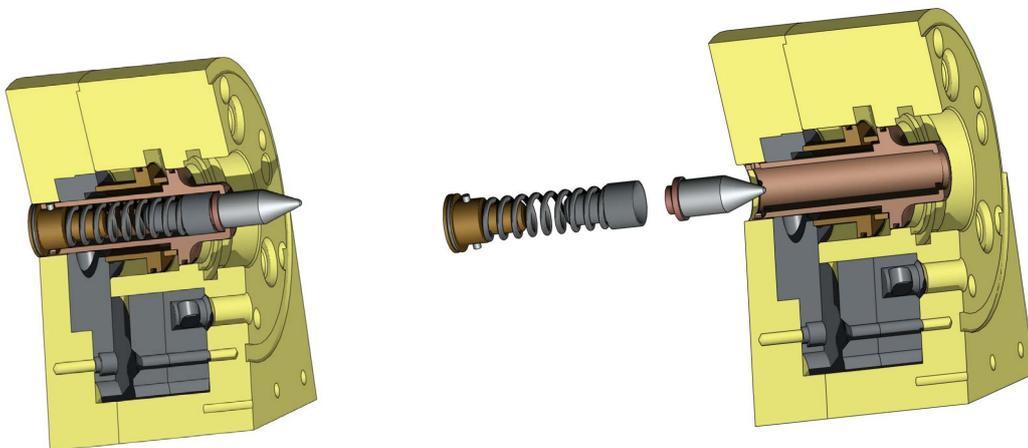


Abb. 34: Kathoden-Schnellwechseleinheit

3.7.5 Pulvereingabe

Wie bereits in Kap. 2.4.2 beschrieben, beeinflussen Art und Position der Pulvereingabe maßgeblich das Pulveraufschmelzverhalten und bestimmen damit auch die deposition efficiency (DE). Für die Bestimmung der optimalen Position bei der Pulvereingabe ist eine genaue Kenntnis über das austretende Plasma notwendig, da nur eine an die Struktur des Plasmas angepasste Eingabe des Pulvers ein Ausnutzen des „Cage Effekts“ (Kap. 2.4.2) ermöglicht. Als besonders vorteilhaft wirkt sich in diesem Zusammenhang aus, dass beim „Delta-Gun“ die Struktur des Plasmastrahls von den Betriebsparametern des Brenners (Stromstärke, Gasflüsse u.s.w.) unabhängig ist. Wie nachfolgend im Kap. 4.4 gezeigt wird, ergibt sich für alle einstellbaren Betriebsparameter nur eine einzige optimale Position der Pulverinjektoren. Die konstruktive Umsetzung zur Positionierung der Injektoren ist in Abb. 35 dargestellt, die den Pulverinjektionshalter und die drei Ausfräsungen am Ausgang des Brenners zeigt.

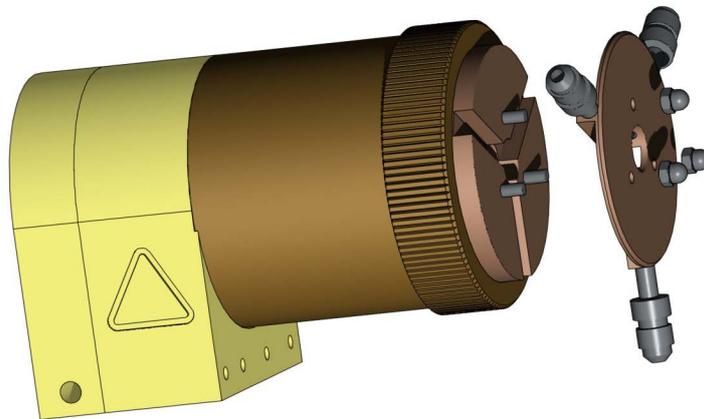


Abb. 35: Pulver-Injektionseinheit mit Fixierungs-Nuten

Die Ausfräsungen fixieren nicht nur den Pulverinjektionshalter, sondern leiten gleichzeitig die Wärme der Pulverinjektoren über die Kontaktfläche in die Generatorkühlung ab.

3.7.6 Düsenkonturen

Die Innenkontur der Düse eines Generators beeinflusst die Geschwindigkeits- und Dichteverteilung des austretenden Plasmagases. Mit der Näherung eines inkompressiblen Gases/ Plasmas ($\rho = const$) und paralleler Strömung zur Brennerachse ($\vec{v} = v_z \cdot \vec{e}_z$) ergibt sich für zwei ebene Querschnitte $\vec{A}_1 = A_1 \cdot \vec{e}_z$ und $\vec{A}_2 = A_2 \cdot \vec{e}_z$ in der Düse das plausible Ergebnis:

$$\int_{A_1} \rho_1 \vec{v}_1 \cdot d\vec{A} = \int_{A_2} \rho_2 \vec{v}_2 \cdot d\vec{A} \quad (3-5)$$

Daraus folgt mit Einführung der gemittelten Geschwindigkeiten $\langle v_1 \rangle = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} v_1 \cdot dA$ und $\langle v_2 \rangle = \frac{1}{A_2} \int_{A_2} v_2 \cdot dA$ das Verhältnis:

$$\frac{\langle v_1 \rangle}{\langle v_2 \rangle} = \frac{A_2}{A_1} \quad (3-6)$$

Für eine Querschnittsänderung erfolgt damit eine Beeinflussung der Gas- bzw. Plasmageschwindigkeiten. In jedem Fall (mit Ausnahme der Lavaldüsen- Situation) wird mit einer sich verengenden Düse eine Erhöhung und mit einer sich aufweitenden Düse eine Verringerung der Gas- bzw. Plasmageschwindigkeit verbunden sein / 21 // 22 /.

Im Gegensatz zu den Generatoren mit kathodenseitiger Lichtbogenaufteilung erlaubt es das Delta-Gun Konzept, den Querschnittsverlauf der Düse relativ frei zu gestalten. Grund hierfür ist der Aufteilungsort der Lichtbögen im Bereich des Düsenausganges, so dass nicht über den gesamten Düsenbereich drei separate Lichtbögen aufrecht erhalten werden müssen. Somit lassen sich Düsendurchmesser bis zu 5mm herab realisieren, ohne die stationären charakteristischen Eigenschaften des Generators zu verlieren / 23 /. Ebenfalls ist der Aufbau von strömungsoptimierten konvergenten/ divergenten Düsenkonturen möglich, so dass auch Konzepte wie beispielsweise Lavaldüsen realisierbar sind / 24 /.

4 Entwicklung und Adaption von Diagnostiken zur Charakterisierung des Plasma- und Partikelstrahls

Bei thermischen Beschichtungsprozessen ermöglicht die Diagnostik des Plasma- und Partikelstrahls die Analyse der physikalischen Vorgänge im Plasmastrahl und die Untersuchung seiner Wechselwirkung mit dem injizierten Pulver. Hierfür stehen eine Reihe verschiedener Verfahren zur Verfügung, die unterschiedliche physikalische Messprinzipien nutzen. In dieser Arbeit wurde ausschließlich auf optische Verfahren zurückgegriffen, da diese den Prozess nicht beeinflussen.

Die Voraussetzung für diese Verfahren ist die optische Zugänglichkeit des Messobjekts, die außerhalb des Plasmagenerators sowohl für den Plasma- als auch für den Partikelstrahl erfüllt ist.

Bei optischen Verfahren wird zwischen aktiven und passiven Methoden unterschieden:

- Falls die Messgröße durch eine externe Strahlungsquelle angeregt oder generiert wird, liegt ein aktives optisches Verfahren vor (Beispiel: Laser Doppler Anemometrie (LDA)) / 25 /.
- Falls keine äußere Energiequelle benötigt und nur die vom Messobjekt emittierte Strahlung erfasst wird, handelt es sich um ein passives optisches Verfahren (Beispiel: Volumenpyrometrie, Kap. 4.4) / 26 /.

Da alle für eine Generatorcharakterisierung erforderlichen Untersuchungen mit den weniger aufwendigen passiven Verfahren möglich waren, fanden nur diese in der vorliegenden Arbeit Verwendung.

Die Eigenschaften des aus dem Generator austretenden Plasmastrahls beeinflussen maßgeblich die Pulverbehandlung / 27 /. Aus diesem Grund erfolgt die Charakterisierung des Plasma- und Partikelstrahls in zwei Stufen. Im ersten Schritt wird der Plasmastrahl ohne Partikel untersucht. In einem weiteren Abschnitt wird für injiziertes Pulver die Wechselwirkung mit dem Plasmastrahl analysiert.

4.1 Computertomografie

Die in diesem Kapitel beschriebene Untersuchung dient zur Analyse des Plasmastrahls. Die vorgestellten Messungen fanden daher ohne die Zugabe von Pulver statt.

Ein etabliertes Verfahren zur Untersuchung thermischer Plasmen ist die Emissionsspektroskopie. Sie erfordert einen verhältnismäßig geringen Aufwand und ermöglicht Aussagen über Temperatur und Teilchendichten des untersuchten Plasmagases. Allerdings stellt dieses Messverfahren folgende Anforderungen an das Messobjekt:

- Das Plasma muss sich im lokalen thermischen Gleichgewicht (LTG) befinden, denn nur für diesen Fall herrscht eine einheitliche Temperatur / 28 /.
- Die Emissionsspektroskopie liefert zunächst nur integrale Daten. Zur Ermittlung lokaler Emissionswerte muss entweder eine Rotationssymmetrie des Plasmastrahls vorliegen, so dass die Abel-Inversion eingesetzt werden kann, oder die Emissionsspektroskopie ist in einer tomografischen Vorgehensweise durchzuführen .

Besonders im Falle von Mehr-Elektroden-Plasmaquellen bietet sich eine tomografische Untersuchung des Rekombinations-Plasmafreistrahl an. Zum einen besitzen deren Plasmafreistrahlen eine mehr oder weniger ausgeprägte Abweichung von der Rotationssymmetrie, zum andern erfüllen sie durch ihr stationäres Betriebsverhalten eine notwendige Bedingung für tomografische Verfahren. Im folgenden Abschnitt wird das in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Messverfahren der emissionsspektroskopischen Computertomografie (CT) näher erläutert.

Wie in Abb. 36 dargestellt, besteht das CT-Meßsystem aus einer Linsenoptik, einem Spektrografen und einer CCD-Kamera. Die Linsenoptik bildet einen Querschnitt des Plasmastrahls auf den Eintrittsspalt des Spektrografen ab. An dessen Austrittsfenster detektiert die CCD-Kamera wellenlängenspezifisch das Eigenleuchten des Plasmas. Die Pixel der CCD-Kamera sind in Form einer Matrix angeordnet, deren Spaltenpositionen l der Wellenlänge λ und deren Zeilen-

positionen k der jeweilig zur Detektionsrichtung (Winkel ϕ) und zur Brennerachse z orthogonalen Koordinate \tilde{y} im Plasmastrahl entsprechen.

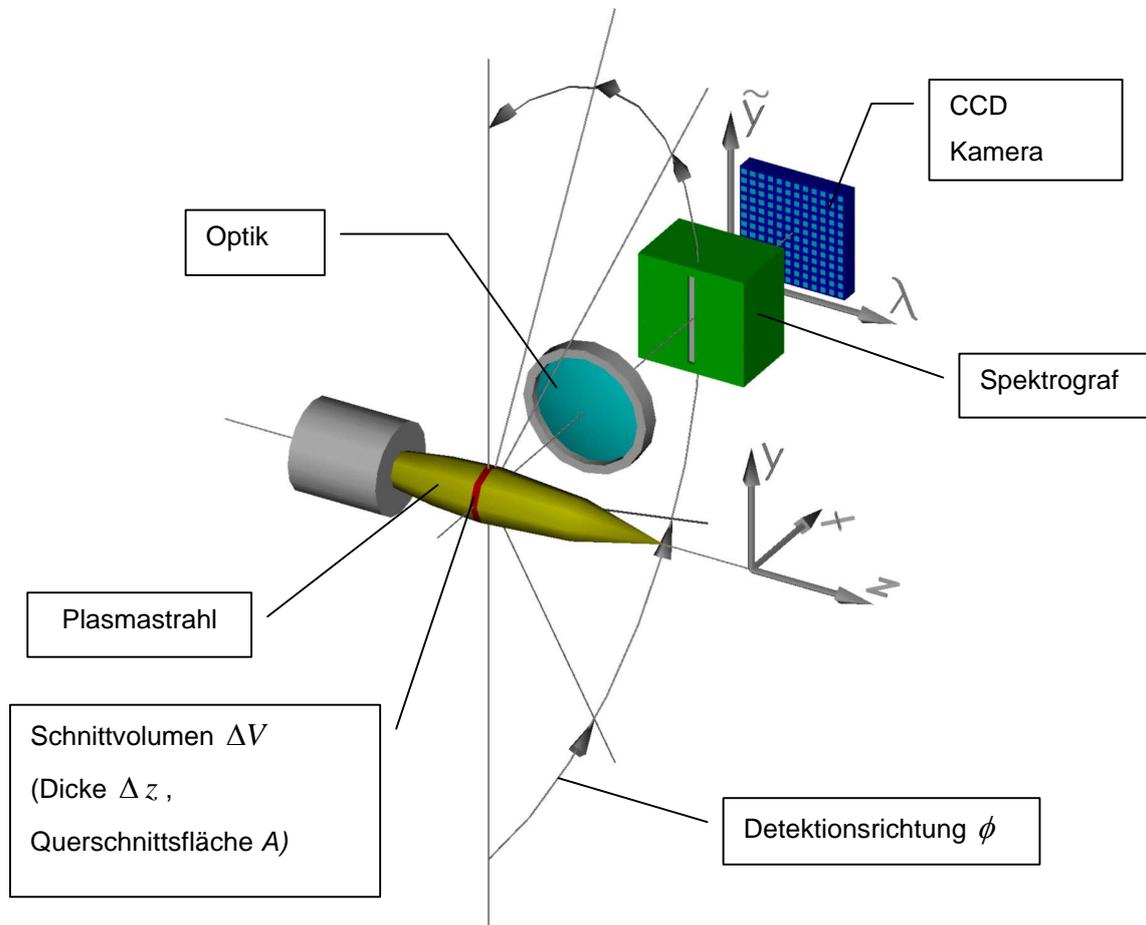


Abb. 36: Schematische Messanordnung der Emissionsspektroskopie mit tomografischer Datenaufnahme

Bei dem tomografischen Verfahren wird das gesamte Messsystem in diskreten, identischen Winkelschritten $\Delta\phi$ um eine definierte Achse gedreht, die üblicherweise mit der Brennerachse zusammenfallend gewählt wird. Bedingt durch diese Drehbewegung ändert sich in gleicher Weise der Winkel, den die \tilde{y} -Achse mit der y -Koordinate einschließt. An jeder Winkelposition $\phi = n \cdot \Delta\phi$ erfolgt im Matrixformat eine Messwertaufnahme durch die Pixelfläche der CCD-Kamera. Im Verlauf eines Messvorgangs entsteht damit ein sogenanntes Tomogramm des Plasmastrahls. Dies ist eine nach den Detektionswinkeln $\phi = n \cdot \Delta\phi$ sortierte Aneinanderreihung von Datensätzen in Form von Matrizen $\overline{\overline{M}}_\phi$, deren Spalten l der diskretisierten Wellenlänge λ und deren Zeilen k der diskretisierten Koordinate \tilde{y}

zugeordnet sind. Insgesamt ergibt sich damit ein 3-dimensionales Datenfeld dessen Elemente $M(n,k,l)$ identisch sind mit den diskretisierten Messwerten $M(\phi, \tilde{y}, \lambda)$. Dieses 3-dimensionale Feld kann sowohl als eine nach den Detektionsrichtungen ϕ (Index n) sortierte Aneinanderreihung von Matrizen $\overline{\overline{M}}_\phi$ als auch als eine nach den Wellenlängen λ (Index l) sortierte Aneinanderreihung von Matrizen $\overline{\overline{M}}_\lambda$ dargestellt werden.

Bei den Matrizen $\overline{\overline{M}}_\lambda$ entspricht die Zeile k unverändert der \tilde{y} -Position wogegen die Spalte n nun die Winkelposition $\phi = n \cdot \Delta\phi$ wiedergibt. Abb. 37 zeigt eine derartige Matrix $\overline{\overline{M}}_\lambda$, deren Aneinanderreihung von Spalten auch als konsequente Wiedergabe ein und derselben CCD-Detektorspalte l - und damit der Wellenlänge λ - für aufeinanderfolgende Detektionsrichtungen $\phi = n \cdot \Delta\phi$ zu sehen ist.

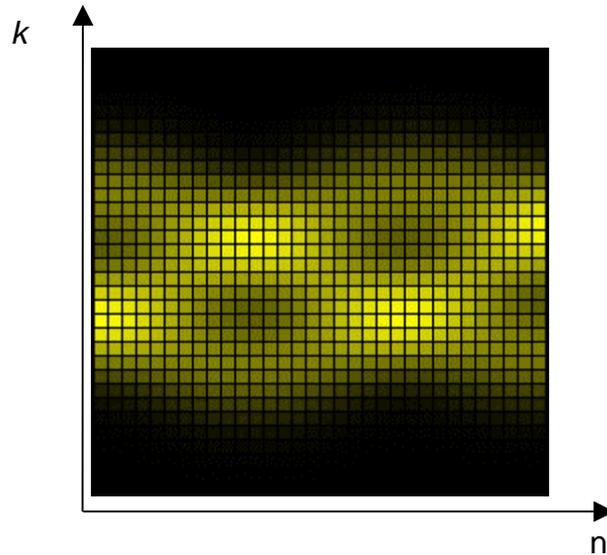


Abb. 37: Tomogramm einer Dreifachintensitätsverteilung als Matrix $\overline{\overline{M}}_\lambda$
(Parameter: Wellenlänge λ)

Jedes Element $M(n,k,l)$ des Datenfeldes ist die Diskretisierung des entsprechenden Messwertes $M(\phi, \tilde{y}, \lambda)$, zu dem die Emissionen aus allen Teilvolumina dV des gesamten Schnittvolumens ΔV beitragen. Mit der wellenlängen- und volumenspezifischen Emission $\varepsilon(x,y,\lambda)$ am Ort x,y des Teilvolumens $dV = dxdy\Delta z$ (Δz als konstante Dicke des Schnittvolumens ΔV aus Abb. 38) ergibt sich eine Gesamtstrahlung $\varepsilon(x,y,\lambda)dxdy\Delta z$ aus dem Volumenelement dV . Davon wird mit der spektralen Detektionsempfindlichkeit $E(\lambda)$ und in Abhängigkeit von der Detektionsrichtung ϕ und der Position \tilde{y} der Bruchteil d^2M detektiert. Mit den

genannten Abhängigkeiten lässt sich für den Beitrag d^2M als funktionaler Zusammenhang schreiben:

$$d^2M = E(\lambda) \cdot f(\varepsilon(x, y, \lambda), \phi, \tilde{y}, \lambda) dx dy \Delta z \quad (4-1)$$

Das gesamte Messsignal $M(\phi, \tilde{y}, \lambda)$ ergibt sich daraus als Doppelintegral, dessen Grundlage die Radon Transformation ist / 29 /.

$$M(\phi, \tilde{y}, \lambda) = E(\lambda) \cdot \Delta z \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\varepsilon(x, y, \lambda), \phi, \tilde{y}, \lambda) dx dy \quad (4-2)$$

Die Bildung der Umkehrfunktion f^{-1} zur Ermittlung der lokalen Messobjektemission $\varepsilon(x, y, \lambda)$ ist analytisch nicht möglich. Es existieren allerdings rekursive Iterationsalgorithmen wie z.B. der verwendete ART-Algorithmus (**A**lgebraic **R**econstruction **T**echniques), mit denen die lokalen Emissionswerte $\varepsilon(x, y, \lambda)$ aus den tomografischen Messdaten $M(\phi, \tilde{y}, \lambda)$ rekonstruiert werden können. Dazu wird die zur z-Achse orthogonale Gesamtfläche A der emittierenden Volumenscheibe (Schnittvolumen ΔV der Abb. 38) in Flächenelemente $A_{i,j}$ gleicher Größe diskretisiert. Damit erfolgt eine Zerlegung des Schnittvolumens ΔV , aus dem die aufgenommene Strahlung emittiert wird, in endliche Teilvolumina $\Delta z \cdot A_{i,j}$.

Wegen der Konstanz der Größe Δz werden die Messwerte $M(n, k, l)$ durch die mit den Flächenelementen $A_{i,j}$ korrelierten Emissionen $\varepsilon_{i,j}(\lambda)$ bestimmt.

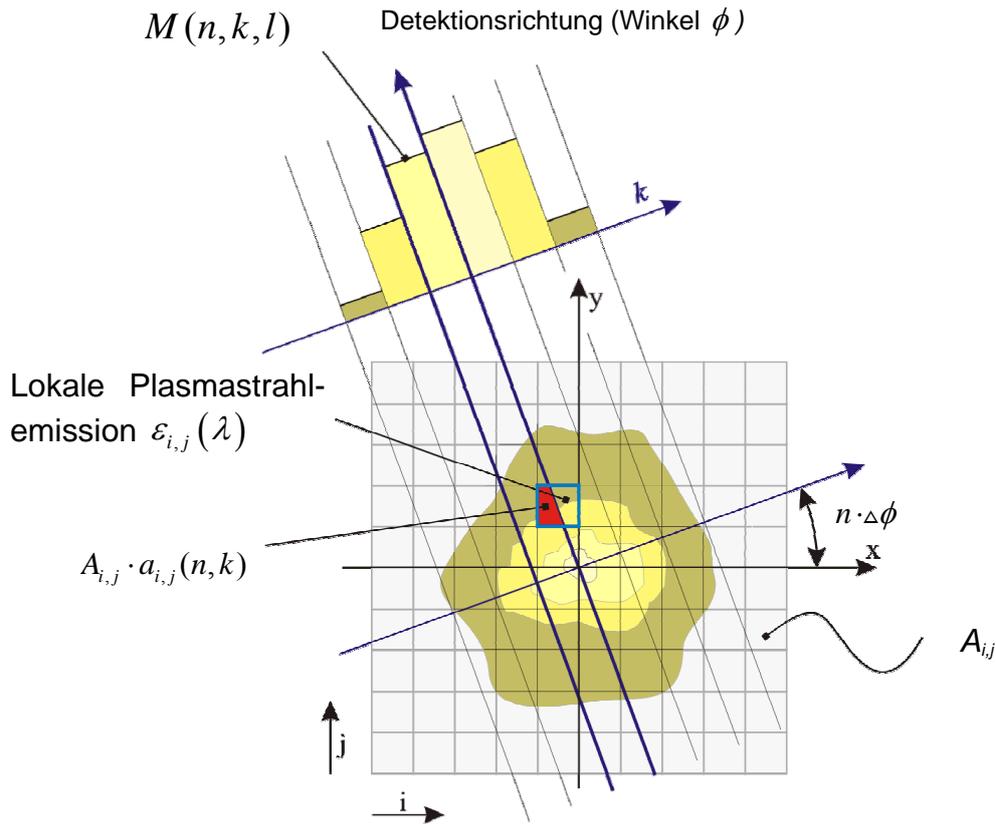


Abb. 38: Beitrag der lokalen Emission $\varepsilon_{i,j}(\lambda)$ des Teilvolumens $\Delta z \cdot A_{i,j}$ aus dem Plasmastrahlschnittvolumen ΔV zum Messsignal $M(n, k, l)$

Jedem Flächenelement $A_{i,j}$ kann nun für seinen Beitrag zum diskretisierten Messwert $M(n, k, l)$ ein relativer Flächenanteil $a_{i,j}(n, k)$ zugeordnet werden. Damit wird festgelegt, mit welchem Anteil bei einem vorliegenden Detektionswinkel $\phi = n \cdot \Delta \phi$ die lokale Emission $\varepsilon_{i,j}(\lambda)$ eines Volumenelementes $\Delta z \cdot A_{i,j}$ mit der Teilfläche $A_{i,j}$ zum Messwert $M(n, k, l)$ in der Pixel-Matrix der Kamera (Zeile k , Spalte l) beiträgt. Für den Fall, dass ein betrachtetes Zeilenelement keine flächenbezogene Schnittmenge mit der Teilfläche $A_{i,j}$ besitzt, wird $a_{i,j}(n, k)$ zu Null. Damit lässt sich die Gleichung (4-2) wie folgt schreiben:

$$M(n, k, l) = E(l) \cdot \Delta z \cdot \sum_i \sum_j A_{i,j} \cdot a_{i,j}(n, k) \cdot \varepsilon_{i,j}(l) \quad (4-3)$$

Für den Fall eines äquidistanten Gitters sind alle Flächenelemente $A_{i,j}$ identisch. Mit $A_{i,j} = A$ und Gleichung (4-3) ergibt sich:

$$M(n, k, l) = E(l) \cdot A \cdot \Delta z \cdot \sum_i \sum_j a_{i,j}(n, k) \cdot \varepsilon_{i,j}(l) \quad (4-4)$$

Zur Rekonstruktion der lokalen Emissionsmatrix $\overline{\varepsilon}_\lambda$ mit den Elementen $\varepsilon_{i,j}(l)$ für eine als Parameter festgehaltene Wellenlänge λ (entsprechend Index l) aus der gemessenen Matrix \overline{M}_λ (vergleiche Abb. 37) wird ein iteratives Verfahren verwendet:

Für jede Iterationsstufe n ergibt sich das Element $\varepsilon_{i,j}^{(n)}(l)$ der Emissionsmatrix $\overline{\varepsilon}_\lambda^{(n)}$ aus der Summe des Elementes $\varepsilon_{i,j}^{(n-1)}(l)$ der vorherigen Iteration und einem Korrekturwert $\tilde{K}_{i,j}(n, k, l)$.

$$\varepsilon_{i,j}^{(n)}(l) = \varepsilon_{i,j}^{(n-1)}(l) + \tilde{K}_{i,j}(n, k, l) \quad (4-5)$$

Zur Berechnung des Korrekturwerts $\tilde{K}_{i,j}(n, k, l)$ wird ein Hilfswert $\tilde{M}^{(n)}(n, k, l)$ gebildet, der sich aus Integration der Teilflächenemissionen unter dem Winkel $\phi = n \cdot \Delta\phi$ der aus der vorherigen Iteration stammenden Emissionsmatrix $\overline{\varepsilon}_\lambda^{(n-1)}$ ergibt. Die flächennormierte Differenz zwischen dem Messwert $M(n, k, l)$ und dem Hilfswert $\tilde{M}^{(n)}(n, k, l)$ bildet den Korrekturwert $\tilde{K}_{i,j}(n, k, l)$:

$$\tilde{K}_{i,j}(n, k, l) = \frac{M(n, k, l) - \tilde{M}^{(n)}(n, k, l)}{A \cdot \sum_i \sum_j a_{i,j}(n, k)} \quad (4-6)$$

Die Abbruchbedingung des Iterationsverfahrens wird durch die Wahl eines Differenzwertkriterium D_{ij} erreicht. Dieses entspricht dem Betrag des Korrekturwertes $\tilde{K}_{i,j}(n, k, l)$:

$$\left| \Delta \varepsilon_{i,j}(l) \right| = \left| \varepsilon_{i,j}^{(n)}(l) - \varepsilon_{i,j}^{(n-1)}(l) \right| = \left| \tilde{K}_{i,j}(n, k, l) \right| < D_{i,j} \quad (4-7)$$

Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Abb. 39 (links unten) für die tomografischen Daten aus Abb. 39 (Mitte) dargestellt. Die rekonstruierte Verteilung der lokalen Messobjektemissionen ist diskretisiert, wobei die Auflösung des

berechneten Schnittbildes von der Zeilenzahl k des Detektors und von der Anzahl n der Winkelschritte $\Delta\phi$ bei der Datenaufnahme abhängt.

In der Praxis haben sich Winkelschritte mit $\Delta\phi = 3^\circ$ entsprechend 60 Aufnahmepositionen für einen 180° Detektionssektor als sinnvoll erwiesen.

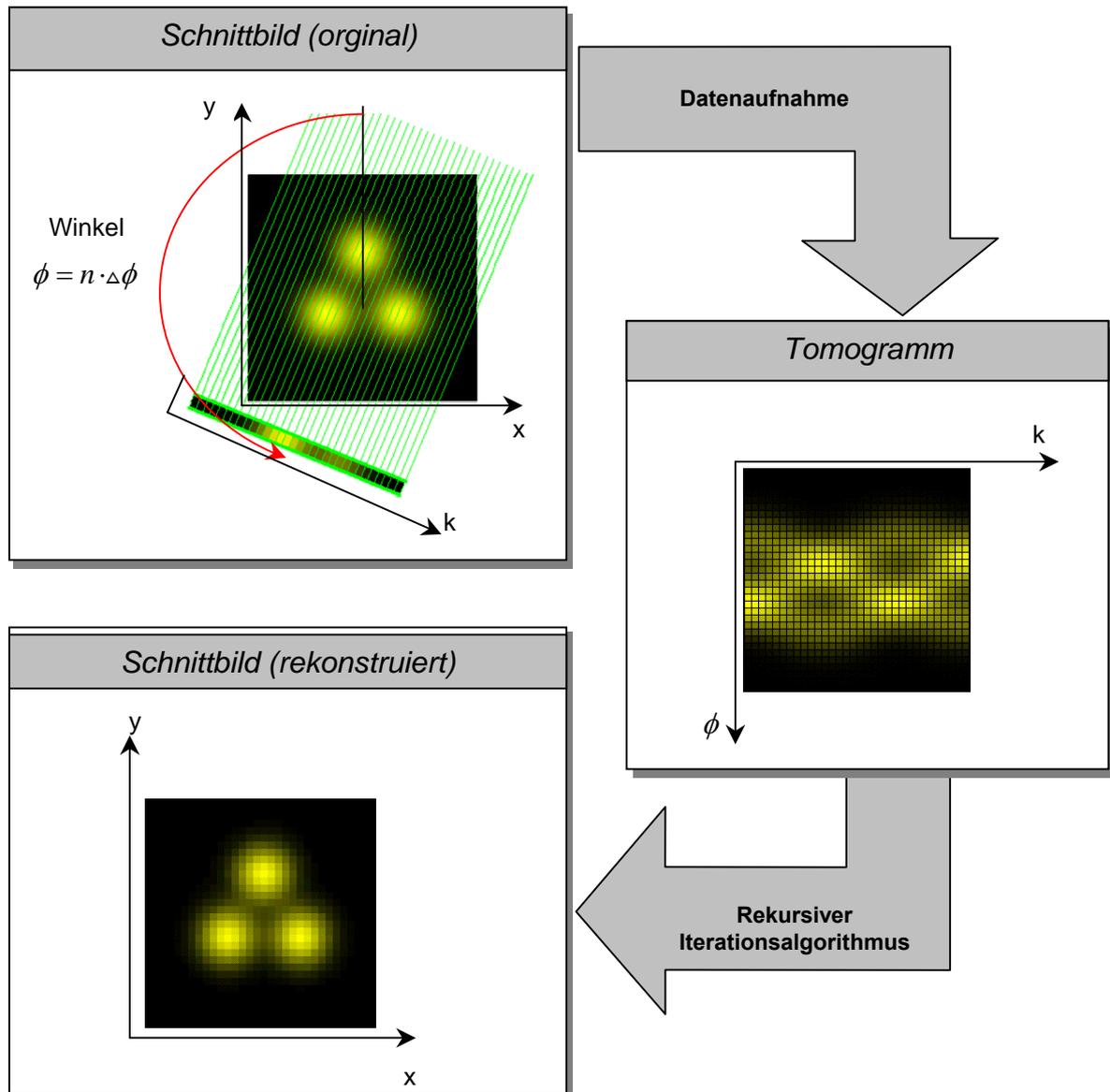


Abb. 39: Tomografische Datenaufnahme und Auswertung für konstante Wellenlänge λ (entspricht festem Parameter l).

In einer ersten Versuchsreihe wurde das Plasmastrahlprofil des „Delta-Gun“ Generators für eine Düse mit 7 mm Durchmesser in einer düsennahen Querschnittsfläche (ca. 2 mm nach Düsenaustritt) bei unterschiedlichen Lichtbogenströmen untersucht. In allen rekonstruierten Schnittbildern zeigte sich reproduzierbar eine strenge Dreifachsymmetrie, deren Lage und Ausprägung nicht von den Betriebsparametern des Plasmabrenners abhängt (Abb. 40, Abb. 41).

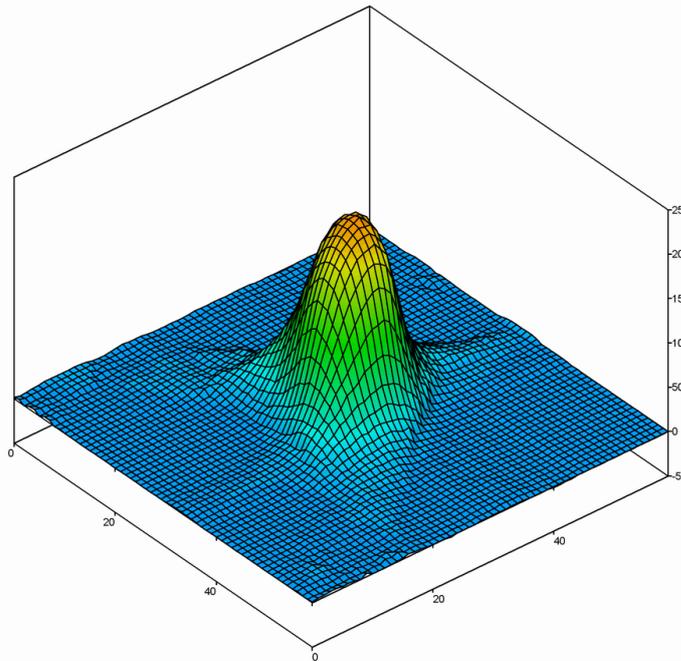


Abb. 40: Rekonstruierte Plasmastrahlemission („Delta-Gun“, 7 mm Düse, 2 mm vom Düsenausgang, Leistung 23 kW, 17 slpm Ar)

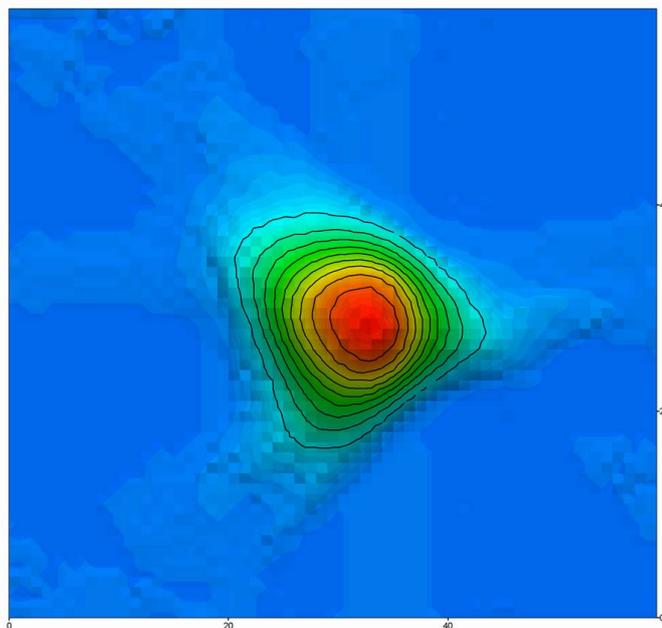


Abb. 41: Rekonstruierte Plasmastrahlemission mit Intensitätskonturen („Delta-Gun“, 7 mm Düse, 2 mm vom Düsenausgang, Leistung 23 kW, 17 slpm Ar)

4.2 Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Die Trägheit des menschlichen Auges lässt selbst stark fluktuierende Prozesse oft gleichmäßig erscheinen, wenn sie mit ausreichend hohen Frequenzen um ihren Mittelwert schwanken. Soll der Plasmastrahl mit einem bildgebenden Verfahren optisch untersucht werden, ist daher darauf zu achten, dass sowohl eine entsprechend kurze Verschlusszeit, als auch eine ausreichende zeitliche Abtastung (Bilder pro Sekunde) eingehalten werden.

Im folgenden Kapitel wird das innovative kombinierte Kamerasystem beschrieben, das die zeitlichen Anforderungen für die optische Aufnahme der Plasmastrahlfluktuationen erfüllt. Das in Abb. 42 dargestellte Kamerasystem bietet die Möglichkeit extrem kurzer Belichtungszeiten (bis zu 1 ns) und einer Mehrfachbelichtung. Dies wird erreicht indem der eigentlichen CCD-Kamera eine Mikrokanalplatte als bildauflösender Sekundärelektronenvervielfacher vorgeschaltet wird (intensivierte Kamera).

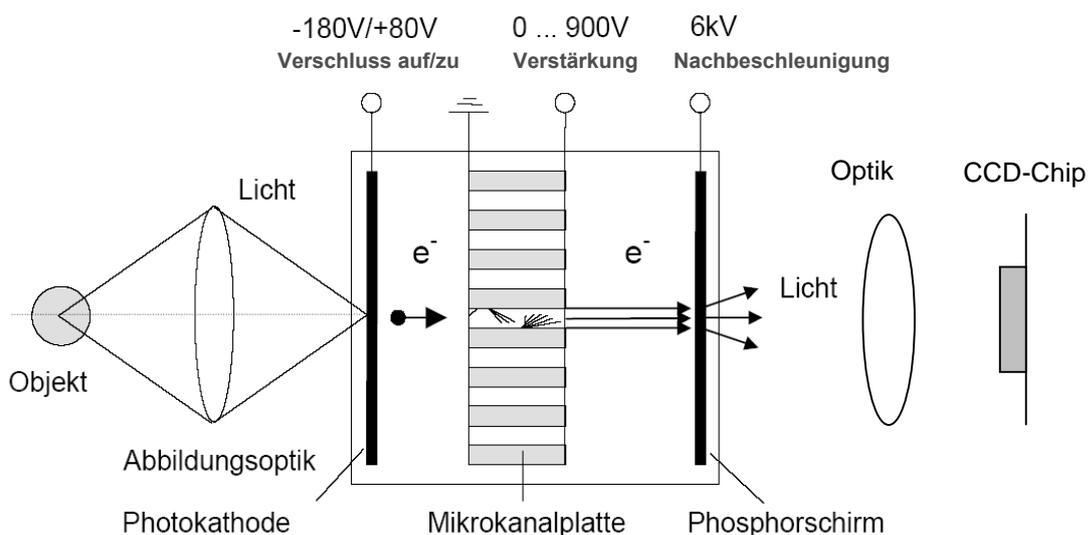


Abb. 42: Schematische Darstellung einer intensivierten Kamera

Während der elektronische Verschluss die Anforderung an geringe Belichtungszeiten ermöglicht, ist der vergleichsweise träge Phosphorschirm nicht in der Lage die notwendige Anzahl von Bildern pro Sekunde zu liefern. Zur Realisierung der geforderten hohen Bildrate wird daher eine Drehspiegelapparatur in Verbindung mit der Mehrfachbelichtungsmöglichkeit der intensivierten Kamera verwendet (Abb. 43).

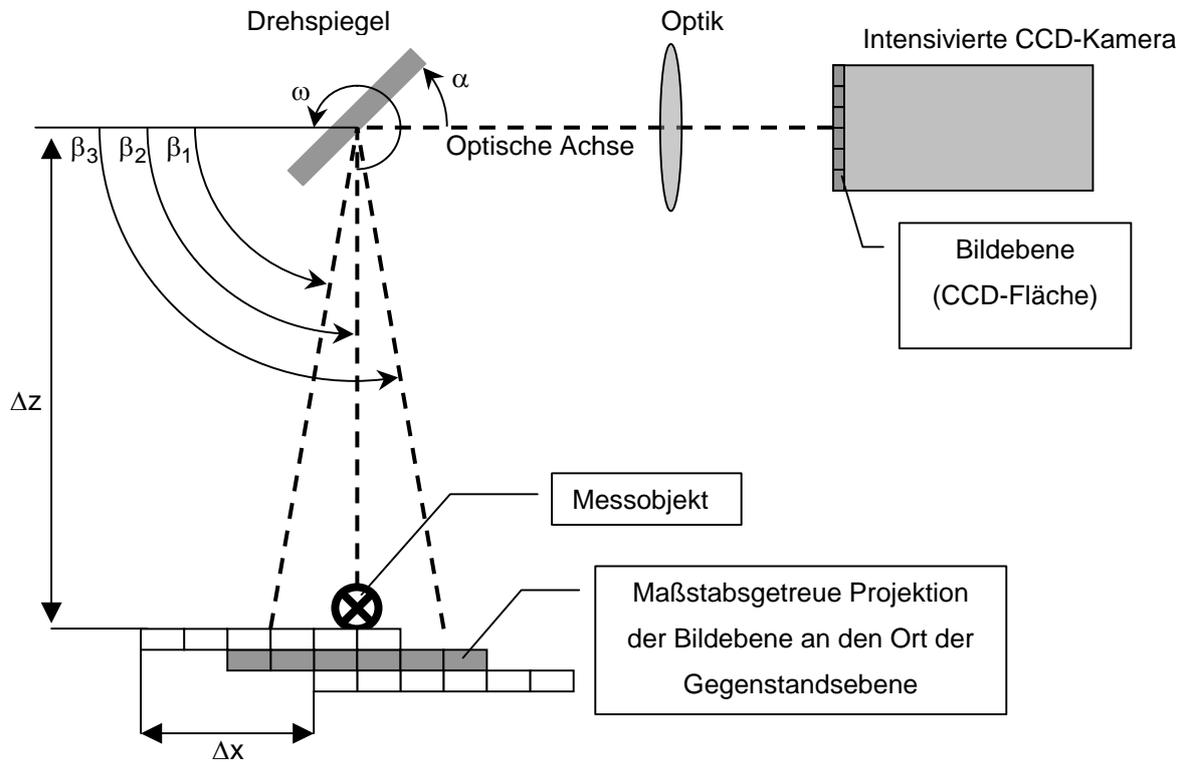


Abb. 43: Schematischer Aufbau für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen

Durch die Drehung des Spiegels wird die zeitliche Auflösung in eine Ortsauflösung überführt. Dabei gilt für dessen Winkelgeschwindigkeit ω_D :

$$\omega_D = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{2} \frac{d\beta}{dt} \quad (4-8)$$

Aufgrund der Mehrfachbelichtung wird die Drehung $d\beta$ zu der diskreten Größe $\Delta\beta$ und es ergibt sich für kleine Winkeländerungen:

$$\Delta x = \Delta z \cdot \Delta\beta = \Delta z \cdot 2 \cdot \omega_D \cdot \Delta t \quad (4-9)$$

Das Messobjekt wird damit zu verschiedenen Zeitpunkten auf verschiedene Orte der CCD-Fläche abgebildet. Als exemplarisches Ergebnis erhält man die in Abb. 44 dargestellte Aufnahme, wobei jeder Streifen einem Zeitpunkt $t = n \cdot \Delta t$ zugeordnet ist.

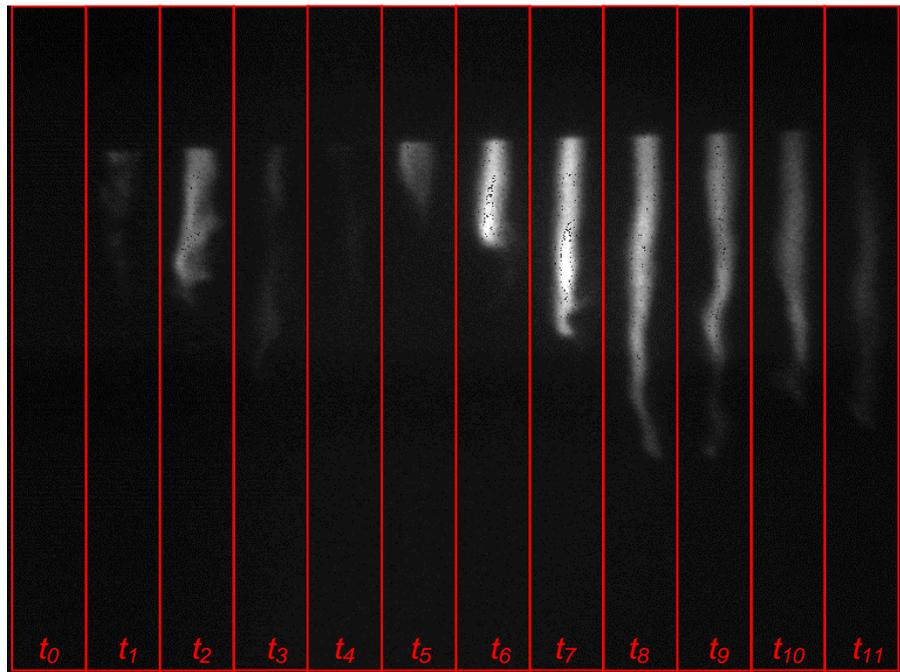
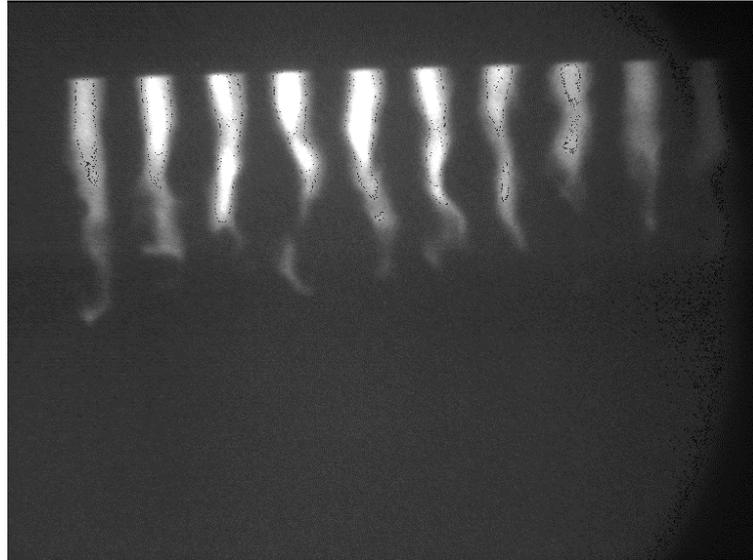
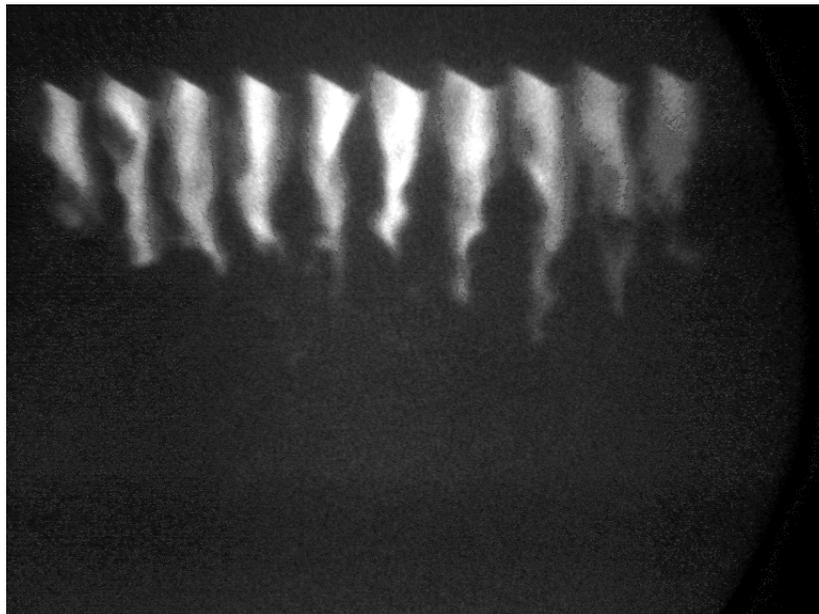


Abb. 44: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines F4-Plasmagenerators,
Belichtungszeit: 5 ns, $\Delta t = 18 \mu s$
(Parameter: 6mm Düse, Strom: 540 A, Plasmagas: 45 slpm Ar, 12 slpm N₂)

Die Untersuchungen am Einzellichtbogensystem (F4, Sulzer Metco) zeigen Zeitabschnitte, die nur einen schwachen oder sogar keinen Plasmastrahl aufweisen (siehe Abb. 44). Im Vergleich dazu tritt bei Mehrlichtbogensystemen eine derartige Verminderung des Plasmastrahls nicht auf (Abb. 45 und Abb. 46). Dennoch sind trotz stabilisierter anodischer Lichtbogenfußpunkte auch bei Mehrlichtbogensystemen deutliche Fluktuationen des austretenden Plasmastrahls zu erkennen. Diese resultieren aus der Tatsache, dass das turbulente Plasmagas beim Eintritt in die umgebende Atmosphäre abgebremst wird. Dabei bilden sich Wirbel aus, die nach Pfender / 30 / durch die Viskosität η_p , die Temperatur T_p und die Dichte ρ_p des austretenden Plasmastrahls beeinflusst werden. Dieser Effekt ist auch unter dem Namen „Entrainment-Effekt“ bekannt / 31 /.



*Abb. 45: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Triplex II-Plasmagenerators,
Belichtungszeit: 3 ns, $\Delta t = 18 \mu s$
(Parameter: 9 mm Düse, Strom: 350 A, Plasmagas: 45 slpm Ar)*



*Abb. 46: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines „Delta-Gun“-Plasmagenerators,
Belichtungszeit: 1 ns, $\Delta t = 18 \mu s$
(Parameter: 7 mm Düse, Strom: 330 A, Plasmagas: 50 slpm Ar)*

4.3 Particle Flux Imaging

Das *Particle Flux Imaging (PFI)* Verfahren dient zur schnellen, phänomenologischen Erfassung des Plasma- und des Partikelstrahls / 13 /. Hierzu werden die charakteristischen Leuchtdichteverteilungen des Plasma- und des Partikelstrahls aufgezeichnet. Bereits geringe Veränderungen der Plasma- und Partikelstrahl-Eigenschaften beeinflussen diese Leuchtdichteverteilungen und können detektiert werden.

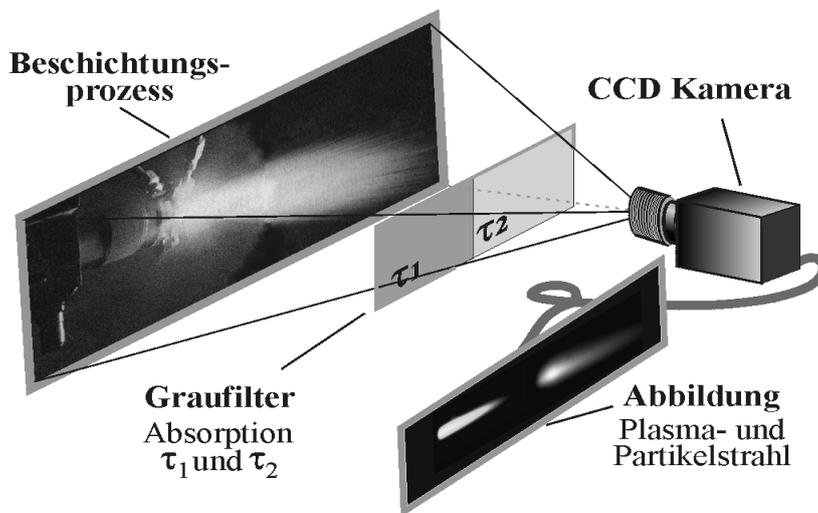


Abb. 47: Prinzip der Bildaufnahme des Diagnostikverfahrens PFI

Das Verfahren ist eine passive optische Volumendiagnostik, mit der gleichzeitig sowohl der stark leuchtende Plasmastrahl in der Nähe des Brenners, als auch der weniger intensiv leuchtende Partikelstrahl in der weiter stromabwärts gelegenen plasmafreien Zone mit einer CCD-Kamera abgebildet wird (vgl. Abb. 47). Eine Bildverarbeitungssoftware reduziert die in den Bildern des Plasmastrahls und Partikelstrahls vorhandenen Informationen durch Zuordnung von Ellipsen, deren Beschreibungsgrößen den aktuellen Zustand des Beschichtungsprozesses charakterisieren. Die dabei verwendeten Ellipsenkenngößen sind in Abb. 48 dargestellt.

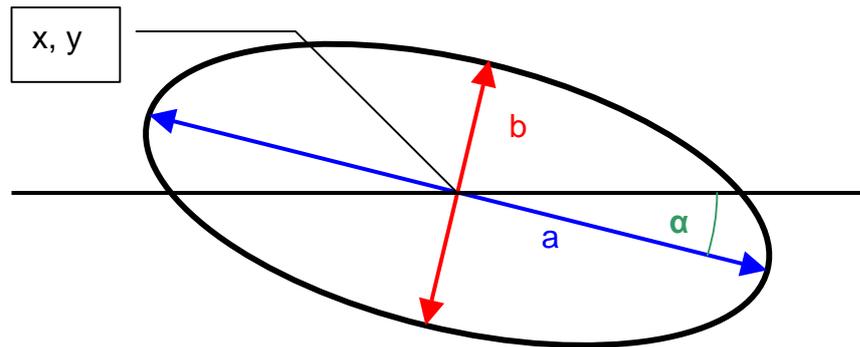


Abb. 48: Ellipsenkenngrößen (x, y, a, b, α) des PFI-Messsystems

Für einen vorab definierten, optimalen Prozess, werden die Ellipsendaten als Vergleichswert (Referenz) gespeichert und mit den aus dem laufenden Prozess permanent neu ermittelten Ellipsendaten verglichen. Auf diese Weise kann, ohne exakte Kenntnis der Plasma- und Partikeleigenschaften, eine Veränderung sowohl im Plasma- als auch im Partikelstrahl insitu erfasst werden.

Dieses Verfahren wurde zur Untersuchung der Auswirkung einer Modulation der anodischen Fußpunkte in Kapitel 4.6 verwendet.

4.4 Volumenpyrometrie

Mit der Zwei-Farben-Pyrometrie oder auch Quotientenpyrometrie lassen sich Temperaturen von Festkörperoberflächen bestimmen [32]. Im Bereich des thermischen Beschichtens eignet dieses Verfahren damit zur Untersuchung des Partikelstrahls. Im Falle marktüblicher Pyrometriesysteme werden jedoch nur punktuelle Informationen in Form der Oberflächentemperatur einzelner Partikel oder Messbereiche mit begrenzter Fläche erhalten. Um Aussagen über den gesamten Partikelstrahl treffen zu können, müssen daher zeitintensive Scan-Verfahren mit einer Vielzahl von Messstellen durchgeführt werden. Um dieses aufwendige Aufnahmeverfahren zu optimieren, wird ein neues ortsauflösendes Volumenpyrometer vorgestellt. Kennzeichen dieses Verfahrens ist eine Partikelstrahlanalyse des gesamten Partikelstrahls, der sich über eine Länge von ca. 30 cm vom Düsenausgang erstreckt. Dadurch wird der gesamte Bereich der für thermische Beschichtungsapplikationen üblichen Spritzabstände abgedeckt. Es ist damit möglich, nicht nur die Temperaturen des Partikelstrahls zu vermessen, sondern auch

die Wechselwirkung von Plasma- und Partikel darzustellen. Im Folgenden wird das Messprinzip der Volumenpyrometrie näher erläutert.

Die temperaturabhängige Strahlungsemission von Festkörpern bildet die Grundlage dieses Verfahrens. Nach dem Strahlungsgesetz von Planck ergibt sich für jedes Flächenelement eines *Schwarzen Körpers* die Strahlungsleistung P in Abhängigkeit seiner Temperatur T und der Wellenlänge λ .

$$P(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{\pi}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \quad (4-10)$$

Abb. 49 zeigt das Strahlungsspektrum eines „Schwarzen Strahlers“ als Funktion der Wellenlänge für verschiedene Temperaturen. Reale Strahler müssen über einen wellenlängen- und körperspezifischen Emissionskoeffizienten $\varepsilon(\lambda)$ korrigiert werden. Die genaue Kenntnis dieses Emissionskoeffizienten $\varepsilon(\lambda)$ stellt ein Problem bei der Messung der Partikeltemperatur dar.

Quotientenpyrometrieverfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass sie aus dem Verhältnis der Strahlungsdichte bei unterschiedlichen Wellenlängen, die Temperatur bestimmen.

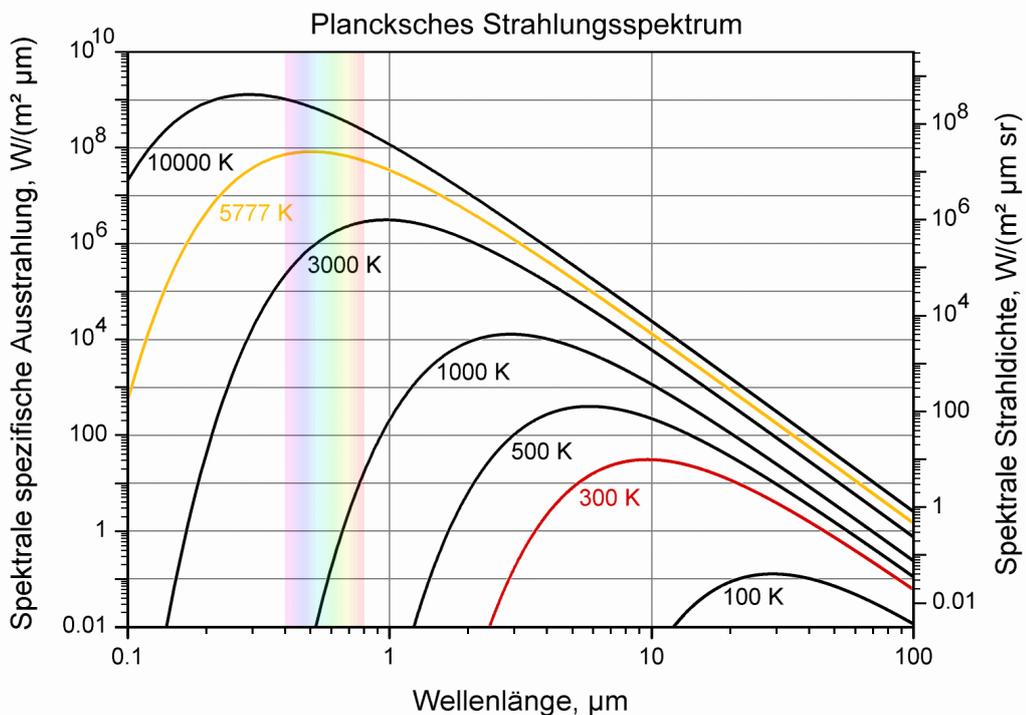


Abb. 49: Plancksches Strahlungsspektrum für Temperaturen von 100 K bis 10000 K

Die vom Partikelstrahl ausgehende Wärmestrahlung wird in dem hier vorgestellten Messsystem von zwei identisch abbildenden Kamerasystemen (Indices $\kappa = 1$ und $\kappa = 2$) simultan aufgenommen. Jede Kamera ist mit einem schmalbandigen Wellenlängenfilter mit den Wellenlängen λ_1 und λ_2 ausgestattet. Daraus resultieren auf den Pixelmatrizen der CCD-Kameras die Bildpunktintensitäten $I_{1,i,j}$ und $I_{2,i,j}$

$$I_{\kappa,i,j}(T) = \frac{K_{\kappa} \varepsilon(\lambda_{\kappa})}{\lambda_{\kappa}^5 e^{\frac{hc}{\lambda_{\kappa} k T_{i,j}}}} \quad \text{mit } \kappa = 1, 2 \quad (4-11)$$

Die Korrekturfaktoren K_{κ} werden benötigt, um die geometrischen und optischen Eigenschaften des Pyrometriesystems zu erfassen. Die Filterwellenlängen λ_1 und λ_2 müssen so gewählt werden, dass in guter Näherung auch für reale Strahler übereinstimmende Emissionskoeffizienten $\varepsilon(\lambda_1) \cong \varepsilon(\lambda_2)$ angenommen werden dürfen (grauer Strahler). Somit werden bei der angewandten Quotientenbildung die wellenabhängigen Emissionsgrade $\varepsilon(\lambda_1)$ und $\varepsilon(\lambda_2)$ durch die Annahme $\varepsilon(\lambda_1) \cong \varepsilon(\lambda_2)$ eliminiert. Nach Umformung der Gleichung (4-11) und der Einführung eines Gesamtkorrekturfaktors $G = \frac{K_2}{K_1}$ ergibt sich die ortsabhängige Temperatur $T_{i,j}$:

$$T_{i,j} = \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \cdot \frac{h \cdot c}{k \cdot \ln \left(\frac{I_1 \lambda_1^5}{I_2 \lambda_2^5} \cdot G \right)} \quad (4-12)$$

Der Korrekturfaktor $G = \frac{K_2}{K_1}$ muss durch eine Kalibriermessung bestimmt werden. Hierzu wird eine Kalibrierlampe mit bekannter Temperaturverteilung \tilde{T} (bestehend aus den Elementen $T_{i,j}$) auf das Kamerasystem abgebildet, so dass sich der Korrekturfaktor G errechnet aus:

$$G = e^{\frac{\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)hc}{T_{i,j,k}}} \cdot \left(\frac{I_1 \cdot \lambda_1^5}{I_2 \cdot \lambda_2^5}\right) \quad (4-13)$$

Wie aus Abb. 49 ersichtlich, sind die Strahlungsintensitäten bei Temperaturen $T < 1000K$ im Bereich der für CCD-Kameras üblichen sichtbaren Wellenlängenbereichen sehr gering und bildet damit die untere Grenze für den Messbereich. Die obere Temperaturengrenze ergibt sich aus dem Umstand, dass Pyrometrieverfahren nur für Festkörper verwendet werden können. Da als Beschichtungswerkstoff in den Versuchen Al_2O_3 verwendet wurde, ergibt sich eine obere Temperaturengrenze von 3253 K entsprechend seiner Siedetemperatur. Abb. 50 zeigt ein typisches Messergebnis wie es später im Vergleich mit den Partikelgeschwindigkeitsmessungen in Kapitel 4.5 Verwendung findet. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass das im kalten Zustand zugegebene Pulver zunehmend aufgeheizt wird.

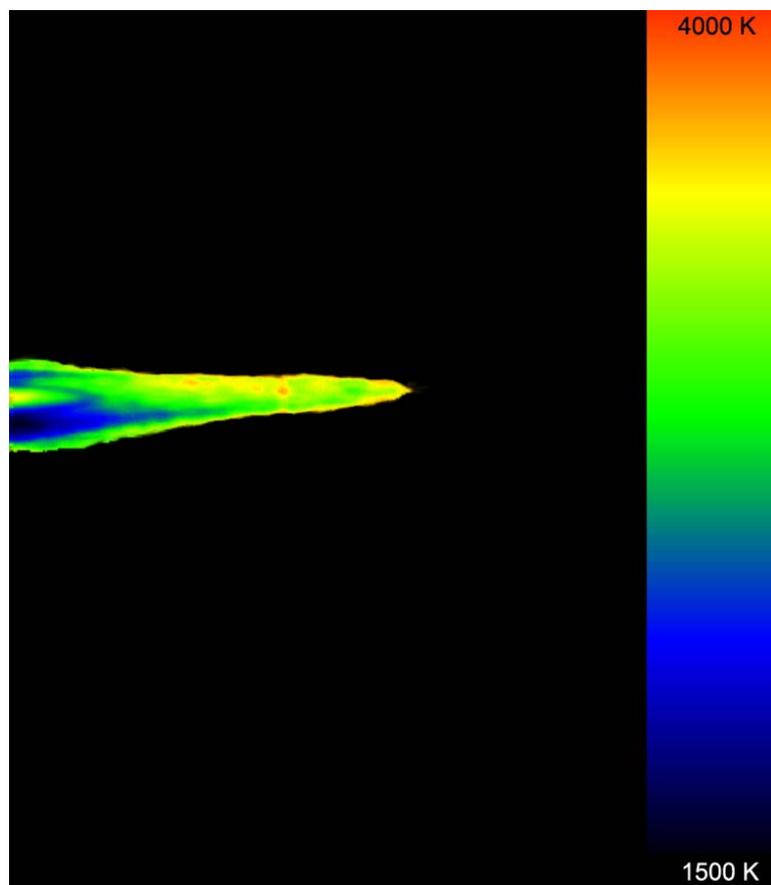


Abb. 50: Volumenpyrometriemessung „Delta-Gun“

Um die Auswirkungen der Pulverinjektionsposition auf den Partikelstrahl zu untersuchen, wird ein einzelner Pulverinjektor in diskreten Winkelschritten $\Delta\varphi = 15^\circ$ azimuthal um die Brennerachse bewegt (Abb. 51). Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des "Delta Gun" ist eine Versuchsreihe zwischen 0° und 120° ausreichend.

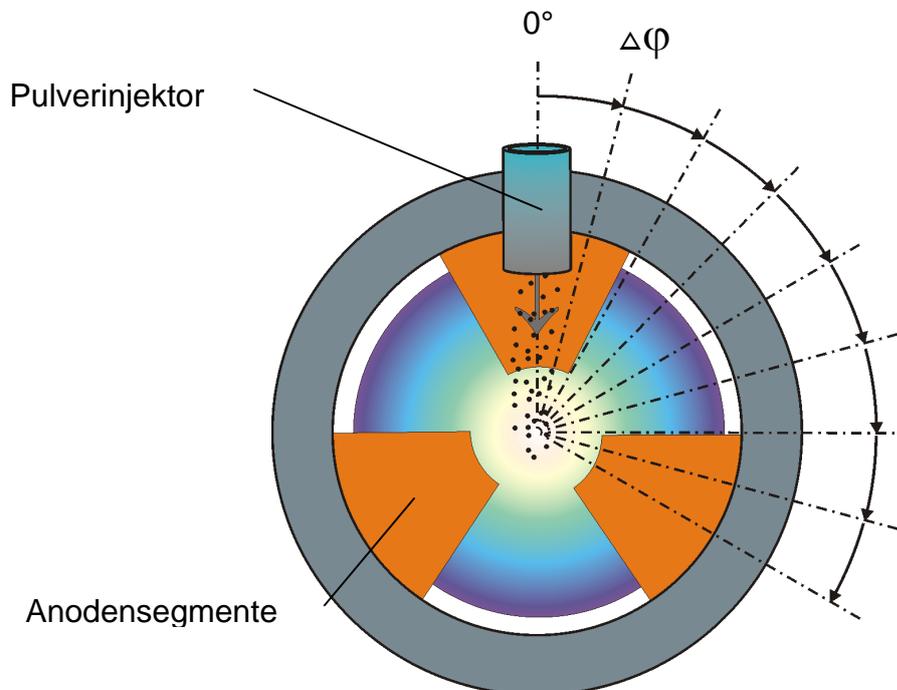


Abb. 51: Variationen der Pulverinjektorposition

Zu jeder Injektorposition wird mittels Volumenpyrometrie die Spritzstrahlänge l_s bestimmt, bei der die Partikel eine Temperatur von mindestens 1600 K haben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 52 dargestellt. Die azimuthale Abhängigkeit der Pulverinjektionsposition ist deutlich nachzuweisen. Demnach wird die grösste Partikelstrahlänge bei einer Injektionsposition von 0° (unmittelbar nach den Anodensegmenten) erreicht und wiederholt sich aufgrund der Symmetrie alle 120° .

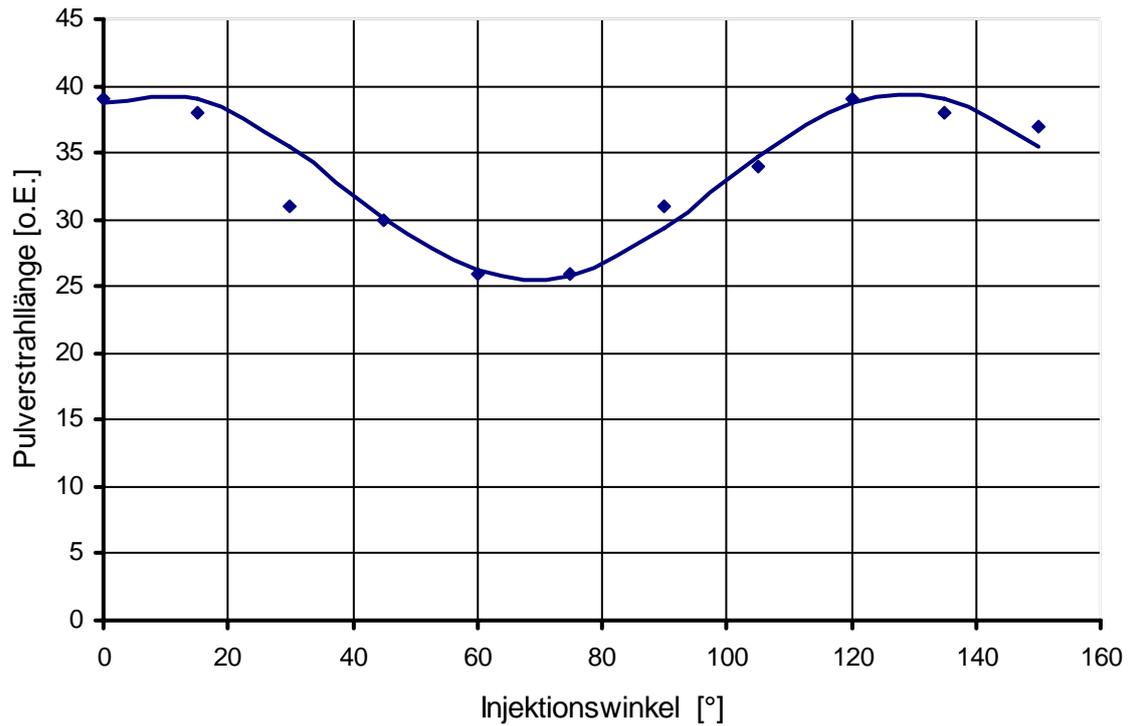


Abb. 52: Änderung der Partikelstrahlänge in Abhängigkeit der Injektorposition

Die signifikanten Unterschiede der Partikelstrahlänge von bis zu 40% verdeutlichen die Empfindlichkeit der Pulverinjektorpositionierung und deren Wichtigkeit für einen optimierten Plasmaspritzprozess.

4.5 Partikelgeschwindigkeitsmessung

Das *Particle Velocity Imaging (PVI)* Verfahren dient zur Messung der Partikelgeschwindigkeiten im thermischen Beschichtungsprozess. Dazu wird der Partikelstrahl von einer CCD- Kamera aufgenommen. Die Bildaufnahme erfolgt dabei mit einer Belichtungszeit t_K von wenigen Mikrosekunden, so dass die einzelnen Partikel als dünne Streifen hoher Intensität dargestellt werden (Abb. 53).

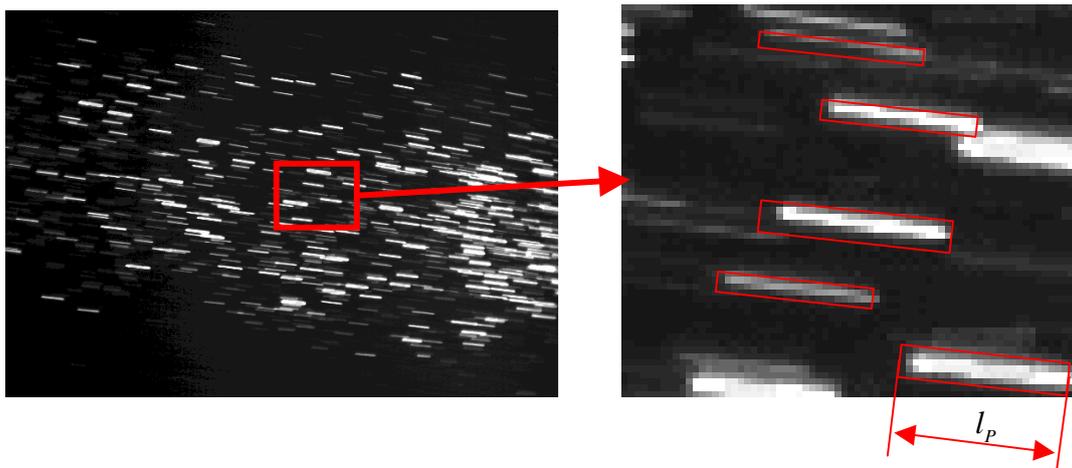


Abb. 53: Auswertung der leuchtenden Partikelstreifen

Mittels Bildverarbeitung wird die Länge l_p der einzelnen Streifen vermessen. Über den Abbildungsmaßstab M und die Belichtungszeit t_K ergibt sich damit die Geschwindigkeit v_p eines Partikels.

$$v_p = \frac{l_p \cdot M}{t_K} \quad (4-14)$$

Die Einzelgeschwindigkeiten v_p werden danach durch die Software statistisch ausgewertet und visualisiert (Abb. 54).

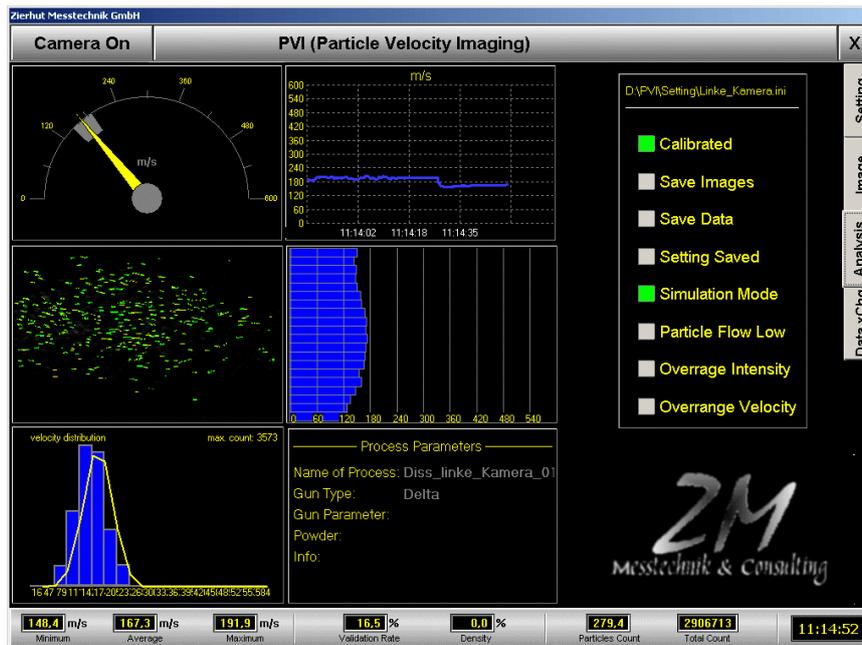


Abb. 54: Softwareoberfläche des PVI Messsystems

Die Vorteile dieses Verfahrens liegen vor allem in seiner hohen Datenrate (Anzahl der Partikel pro Bild kombiniert mit einer Bildrate von ca. 5 Bilder pro Sekunde) und der Möglichkeit einer Online Auswertung.

Da der aufgenommene Bildausschnitt nur einen Bereich von 50x30 mm abdeckt, werden für die Vermessung des Partikelstrahls mehrere Messungen entlang der Düsenachse durchgeführt. Neben den gemittelten Geschwindigkeiten im betrachteten Messbereich, können über Konturplots sowohl die positionsabhängige Geschwindigkeits- als auch Dichteverteilung ausgewertet werden.

Abb. 55 zeigt die mittlere Geschwindigkeit von Aluminiumoxid Partikeln in Abhängigkeit vom Düsenabstand. Aufgrund des starken Plasma-Eigenleuchtens liefert eine PVI Messung erst ab einem Abstand von 60 mm vom Düsenausgang sinnvolle Ergebnisse. Die tendenziell hohen Geschwindigkeiten der Partikel sind durch die verhältnismäßig geringe Pulverförderrate von 30 g/min zu erklären. Auffällig ist der Unterschied zwischen den Partikelgeschwindigkeiten bei 35 kW und denen höherer Leistung. Es wird angenommen, dass die geringe Leistung nicht für ein vollständiges Aufschmelzen vor allem der größeren Partikel ausreicht, so dass damit nur die schnellen, kleinen Teilchen vom PVI-System erfasst werden.

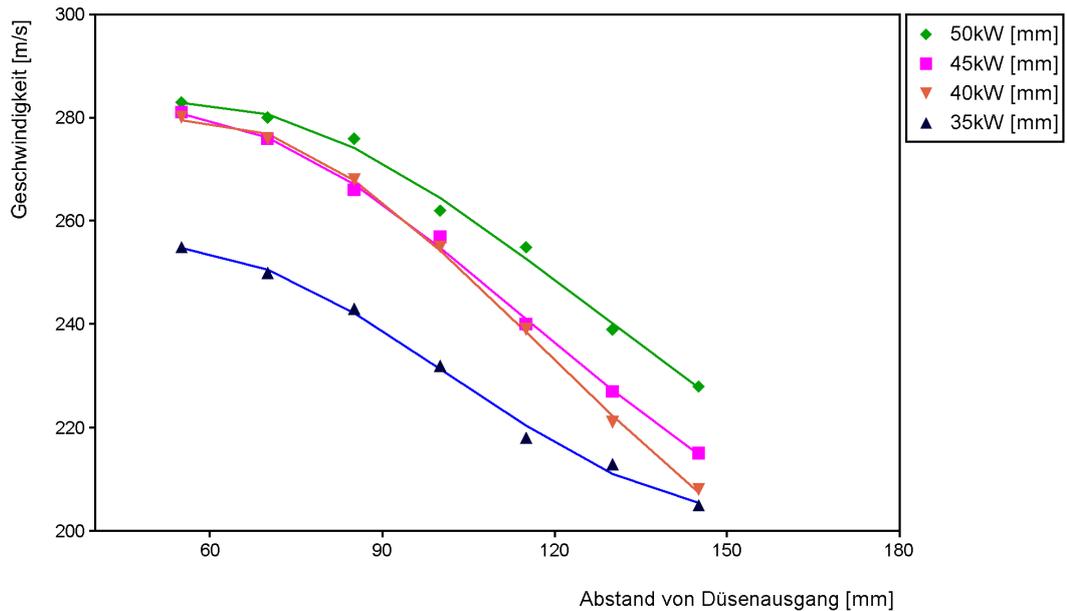
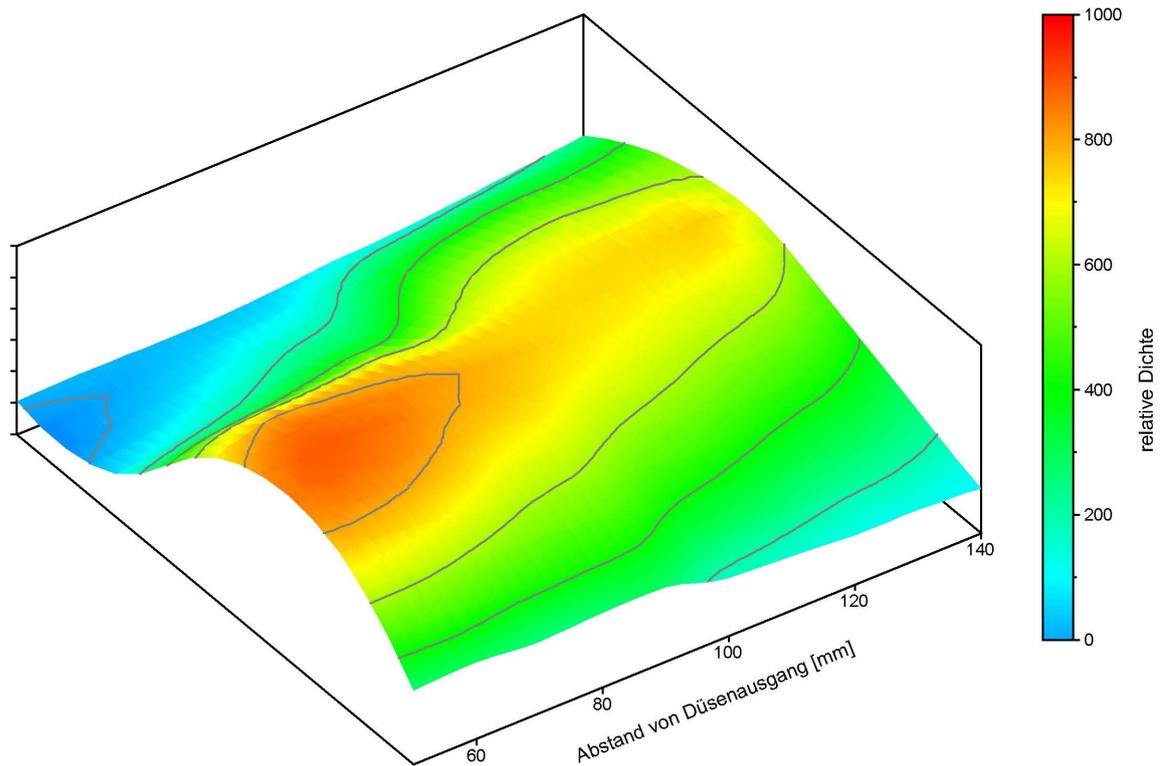


Abb. 55: Mittlere Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Düsenabstand (Parameter: 7 mm Düse, 50 slpm Ar, 50 kW, Pulver Al_2O_3 -45 +20 μm)

Am Ort der maximalen Partikelgeschwindigkeiten entspricht diese generell der dort vorliegenden Geschwindigkeit des austretenden Plasmas. Orte und Werte der Geschwindigkeitsmaxima in Abb. 55 stimmen gut überein, so dass für den Leistungsbereich 40-50 kW an der Position 60 mm nach Düsenausgang die Plasmagasgeschwindigkeit auf ca. 280 m/s abgeschätzt werden kann.

Die Partikel- Dichteverteilung aus Abb. 56 lässt Rückschlüsse auf die aufgeschmolzenen Partikel und damit auf die Strahlqualität zu. Nur ein konzentrierter, homogener Partikelstrahl ermöglicht auch die Erzeugung einer homogenen Schicht mit über den gesamten Bereich gleichmäßigen Schichteigenschaften / 4 /.



*Abb. 56: Relative Dichteverteilung der Partikel
(Parameter: 7 mm Düse, 50 slpm Ar, 50 kW, Pulver Al_2O_3 -45 + 20 μm)*

Bei einem typischen Spritzabstand von 100 mm vom Düsenausgang zeigt sich für den „Delta-Gun“ ein konzentrierter, zeitlich stabiler Spritzstrahl.

4.6 Modulation der anodischen Fusspunkte

Der Lichtbogenverteilungspunkt im „Delta-Gun“ Generator befindet sich in der Nähe der 3 Teilanoden. Auch für den in Abb. 57 dargestellten Fall der Abschaltung eines Teilstromes (in dem gezeigten Fall der Teilstrom zwischen Lichtbogenverteilungspunkt und 1. Anode) bildet die Strecke zwischen Kathode und Lichtbogenverteilungspunkt den Hauptteil der Lichtbogenlänge zwischen Kathode und Position der Anoden.

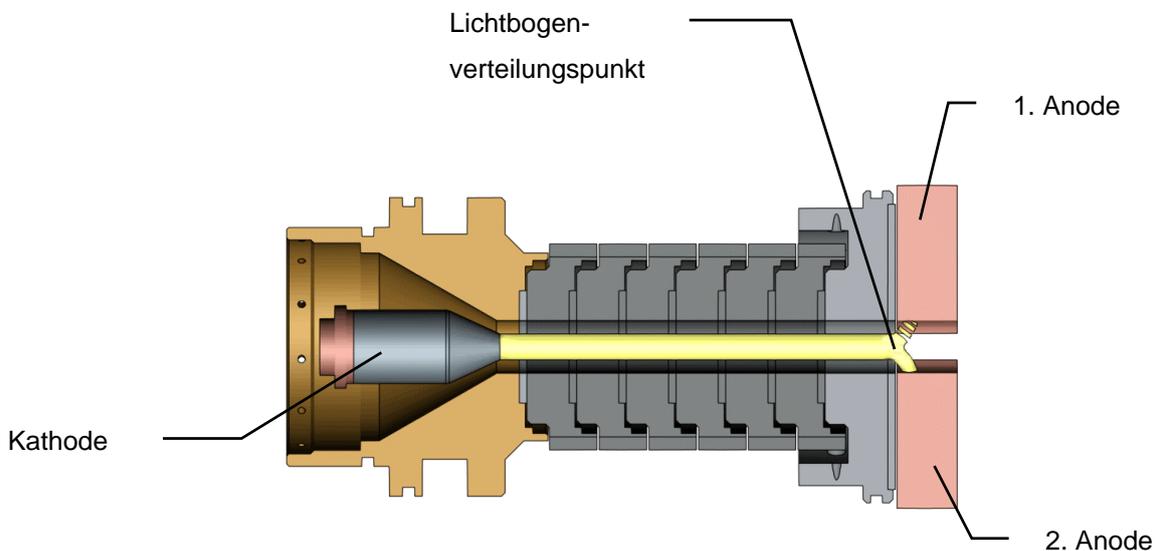


Abb. 57: Lichtbogenentladung im „Delta-Gun“-Generator mit bestehendem und unterbrochenem Teilstrom

In diesem Beispiel wird durch den bestehenden Lichtbogen eine hohe Ladungsträgerdichte erzeugt, die sich auch in das Gebiet zwischen Lichtbogenverteilungspunkt und abgeschalteter Anode erstreckt und dort ein problemloses Wiederzünden des unterbrochenen Teilstromes ermöglicht. Diese bereits bei der Zündung in Kap. 3.2 ausgenutzte Eigenschaft, lässt sich im Folgenden für eine Modulation der anodischen Teillichtbögen verwenden / 33 /.

Zur Realisierung der Modulation werden statt drei Stromquellen, eine Stromquelle und jeweils zu den Anodensegmenten in Serie geschaltete Widerstände R_1 , R_2 , R_3 zur Symmetrisierung der Teilströme eingesetzt (Abb. 58). Als Schalt-

elemente werden parallel zu den Symmetrisierungswiderständen IGBTs verwendet, mit denen Schaltfrequenzen bis 10 kHz bei Strömen bis 500 A realisiert werden.

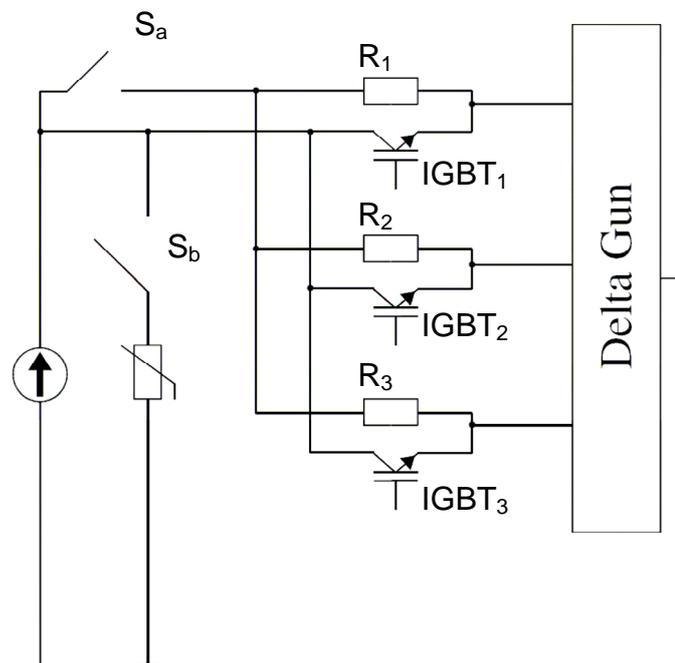


Abb. 58: Schematische Darstellung der elektrischen Beschaltung zur Modulation der anodischen Teillichtbögen

Bei dem in Abb. 58 dargestellten Aufbau sind 3 Betriebsmodi möglich:

- 1) unmodulierter Betrieb bei geschlossenem Schalter S_a
- 2) modulierter Betrieb bei geschlossenem Schalter S_a
- 3) modulierter Betrieb bei geöffnetem Schalter S_a

Der Modus 1 stellt den Betriebszustand des Generators dar, in dem jeweils 1/3 des Gesamtstromes zeitlich konstant über die Anodensegmente fließt. Im Betriebsmodus 2 übernehmen die Widerstände R_1 , R_2 , R_3 jeweils einen geringen Teilstrom, so dass die Anodensegmente zu keinem Zeitpunkt stromlos sind. Im Betriebsmodus 3 muss zu jedem Zeitpunkt zumindest eines der IGBT Module angesteuert werden, da es sonst zu einem Abreißen des Lichtbogens kommt.

Zum Schutz der IGBT Module vor Überspannungen, die im Falle eines Abreißen des Lichtbogens durch Induktivitäten der Stromquelle hervorgerufen Überspannung werden, wird nach erfolgter Zündung über den Schalter S_b ein Varistorblock parallel zur Stromquelle verbunden.

Die Auswirkungen der Modulation der anodischen Teillichtbögen auf den Plasma- und Partikelstrahl des Generators werden mit dem PFI System (Kap. 4.2) untersucht. Als Grundzustand für die Festlegung der Referenzellipsen dieses Diagnostikverfahrens wird der Betriebsmodus 1 verwendet.

In den Betriebsmodi 2 und 3 werden die IGBTs mit unterschiedlichen Tastverhältnissen $T = \frac{\text{Zeit des Stromflusses}}{\text{Periodendauer}}$ bei einer Frequenz von 4 kHz angesteuert.

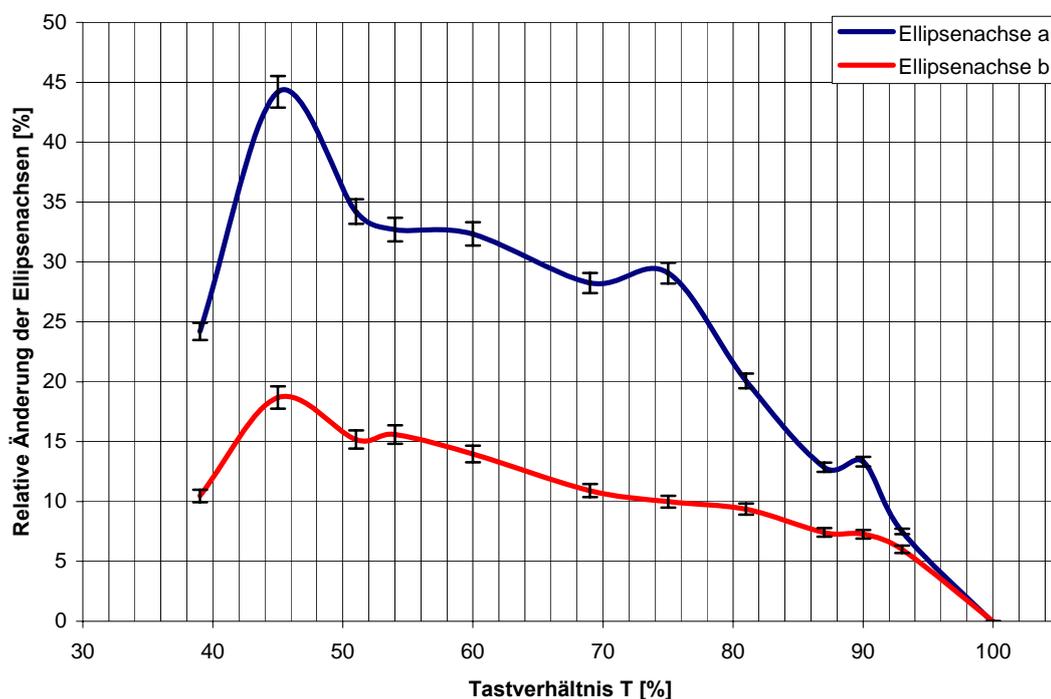


Abb. 59: Relative Änderung der Ellipsenachsen a und b in Abhängigkeit des Tastverhältnis (Parameter: Strom: 280A, Plasmagas: 50Ar, Pulvereingabe: Einzelinjektor)

Abb. 59 zeigt für den Betriebsmodus 3 die prozentualen Änderungen $\frac{a}{a_{ref}}$ und $\frac{b}{b_{ref}}$ der Halbachsen a und b der Pulverstrahlellipse bezogen auf die Achsen a_{ref} und b_{ref} der Referenzellipse in Abhängigkeit vom Tastverhältnis. Die Änderung $\frac{a}{a_{ref}}$ der Ellipsenachse a, die der Länge des leuchtenden Partikelstrahls entspricht, zeigt bei dem Tastverhältnis $T = 45\%$ ein ausgeprägtes Maximum. Dies bedeutet eine maßgebliche Verlängerung der Partikelstrahlellipse, und weist damit auf ein besseres

Aufschmelzen der Partikel hin. Es ist somit gezeigt, dass durch Modulation der anodischen Teillichtbögen eine effizientere Pulverbehandlung im Plasmastrahl ermöglicht wird.

4.7 Beschichtungsversuche

Um die Leistungsfähigkeit des „Delta-Gun“ Generators als Plasmaspritzbrenner nachzuprüfen, wurden exemplarisch zwei Schichttypen hergestellt. In Abb. 60 ist beispielhaft ein Querschliff für eine Cr_2O_3 -Schicht gezeigt. Bei einer Pulverförderrate von 100 g/min beträgt die Depositionseffizienz dabei 45%. Die in einem einzigen Übergang gespritzte 220 μm dicke Schicht weist eine Kleinlasthärte von 1350HV 0,3 auf / 34 /.

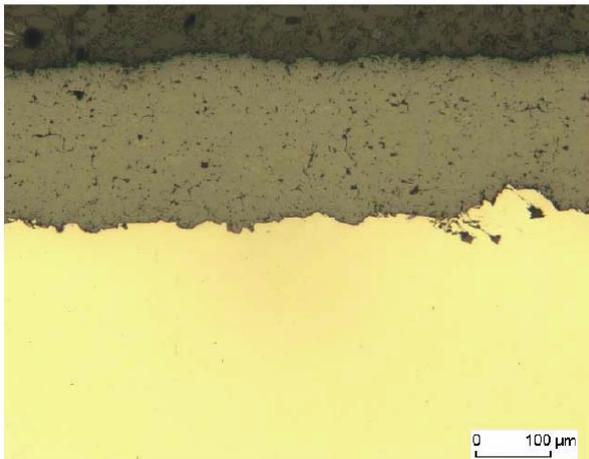


Foto-Nr: 0602°01102
Vergrößerung: 100:1

Delta, 7mm Düse

Cr_2O_3 ($20\mu\text{m} < d < 45\mu\text{m}$)

Plasmagas Ar/ He= 20/ 30 slpm

Trägergas = 3 slpm

Förderrate = 3x 33 g/min

I = 132 A pro Anode

P = 50 kW

d=100 mm

Kleinlasthärte: 1350 HV0,3

Schichtdicke: 220 μm

Abb. 60: Querschliff einer Chromoxid (Cr_2O_3)-Probeschicht

Beschichtungsversuche mit Al_2O_3 ergaben eine Kleinlasthärte von 900 HV0,3 und liegen damit im Bereich konventioneller Plasmaquellen. Beachtenswert ist hierbei die hohe Pulverförderrate von 120 g/min.

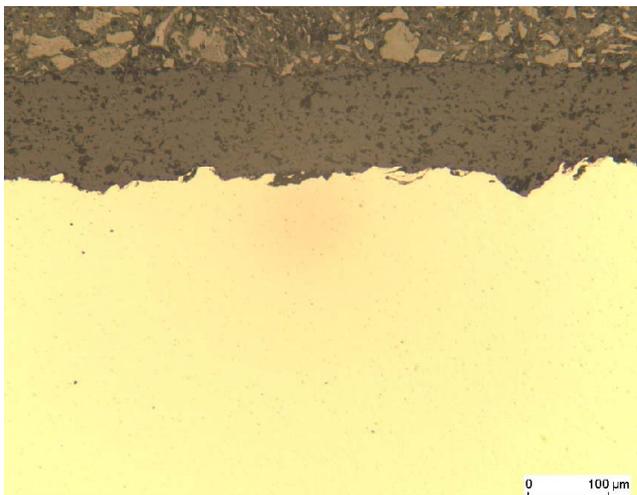


Foto-Nr: 0601A00247

Vergrößerung: 100:1

Delta, 7mm Düse

Al_2O_3 ($20\mu\text{m} < d < 45\mu\text{m}$)

Plasmagas Ar = 40slpm

Trägergas = 3 slpm

Förderrate = 3x 40 g/min

I = 130 A pro Anode

P = 50 kW

d=100 mm

Kleinlasthärte: 900 HV 0,3

Schichtdicke: 150 μm

Abb. 61: Querschliff einer Aluminiumoxid (Al_2O_3)-Probeschicht

Die Auswertung der Schliffbilder zeigt, dass mit dem „Delta-Gun“ im Plasmaspritzverfahren mit hoher Pulverförderrate und hoher Depositionseffizienz Schichten produziert werden können, die in den getesteten Eigenschaften denen konventioneller Plasmaspritzbrenner gleichwertig oder überlegen sind.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Stetig steigende Anforderungen an thermisch gespritzte Schichten sind nur noch mit sehr aufwendigen Prozessführungen oder mit Plasmaspritzgeneratoren realisierbar, die eine deutlich homogenere Pulverbehandlung als konventionelle Einzellichtbogensysteme ermöglichen.

Die Entwicklung eines neuen Plasmaspritzgenerators, der den hohen Anforderungen an Homogenität und Stationarität der Pulverbehandlung gerecht wird, bildet den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Hierzu wurden zunächst konventionelle Plasmageneratoren hinsichtlich ihrer charakteristischen Lichtbogeneigenschaften und der damit verbundenen Wechselwirkung von Plasmastrahl und injizierten Partikeln untersucht. Bei diesen Untersuchungen kristallisierten sich zwei wesentliche Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Plasmageneratoren und damit für eine Optimierung des Spritzprozesses heraus. Zum einen führt eine Lichtbogenstabilisierung zu einer homogenen Pulverbehandlung, die im Falle von Mehrlichtbogensystem durch Ausnutzung des „Cage-Effekts“ (Pulvereinschluss in den Plasmastrahl) noch weiter verbessert werden kann. Zum anderen führt eine Pulverinjektion, deren optimale Position keine Abhängigkeit von den möglichen Betriebsparametern des Generators aufweist, zu einer Verringerung möglicher Fehler und damit zu einer Steigerung der Prozesssicherheit. Die Realisierung eines Plasmagenerators, der diesen Vorgaben genügt, war Ziel dieser Arbeit.

Als Lösung wurde der Mehranoden- Generator „Delta-Gun“ entwickelt und aufgebaut, der sich vor allem durch sein effizientes und gleichmäßiges Pulveraufschmelzen auszeichnet und zudem die geforderte Parameterunabhängigkeit für eine optimierte Positionierung der Pulverinjektoren aufweist. Das Generatorkonzept ermöglicht lange Betriebsstandzeiten bei Leistungsumsätzen von 50 kW, die aufgrund der 50 mm langen Düse und der daraus resultierenden hohen Spannung auch ohne Molekulgase erreicht werden.

Die Anforderung der Industrie, Ausfallzeiten so gering wie möglich zu halten, fanden bei der Konstruktion des „Delta-Gun“ Berücksichtigung. Neben der Realisierung langer Standzeiten wurde daher darauf geachtet, einen zügigen Wechsel typischer Verschleißkomponenten, wie Kathode, Anoden und Düse zu

ermöglichen (Kontaktkühlsystem und Schnellwechselferschluss für die Kathode; auswechselbares Kompletmodul für Anoden- und Düsenelemente). Die physikalischen Eigenschaften dieses Generatorkonzepts ermöglichen ferner, die Düsenkontur in einem großen Bereich frei gestalten zu können. Daraus resultieren konstruktive Freiheiten, die bei anderen Mehrlichtbogensystemen nicht oder nur eingeschränkt möglich sind.

Zur Untersuchung des Betriebsverhalten des Generators wurden neben Strom- und Spannungsmessungen auch Messungen mit Diagnostikverfahren durchgeführt, die speziell für diese Art von Generator entwickelt oder adaptiert wurden. Hierzu zählen vor allem das

- *Computertomografieverfahren*, das den ausströmenden Plasmastrahl hinsichtlich seiner Intensitätsverteilung dreidimensional vermisst
- *Hochgeschwindigkeitskamarasystem*, mit dem der Plasmastrahl ultrakurzzeitbelichtet in einer zusammenhängenden Bildfolge erfasst werden kann
- *Volumenpyrometriesystem*, das die Temperaturen des Partikelstrahls von der Eingabe bis zum Spritzabstand bestimmt
- *Partikelgeschwindigkeitsmesssystem*, das die Geschwindigkeiten der Partikel, ebenfalls von der Eingabe bis zum Spritzabstand ermittelt

Mit diesen Diagnostikverfahren konnte zum einen der Zusammenhang zwischen dem „Cage- Effekt“ und dem Pulveraufschmelzverhalten nachgewiesen werden und zum andern die Unabhängigkeit der Betriebsparameter für die optimierte Positionierung der Pulvereingabe gezeigt werden. Es ergab sich, dass der Einsatz von Mehrlichtbogensystemen die Forderung nach einem stationär austretenden Plasmafreistrahl erfüllt. Es treten keine Instabilitäten auf, wie sie bei Einzellichtbogensystemen zu beobachten sind.

Erste Untersuchungen der mit diesem Generator gespritzten Schichten zeigen ein hohes Potential dieses Generatorprinzips. Als besonders erwähnenswert ist hier die hohe Pulverförderleistung bei gleichzeitig hohem Auftragswirkungsgrad anzuführen.

Als zukünftige weitere Arbeitsschritte stehen die Auffindung und Optimierung eines Parameterfeldes für die Verarbeitung unterschiedlichster Pulver an. Parallel dazu ermöglicht die konstruktiv frei gestaltbare Innenkontur der Generatordüse

erstmalig für Mehrlichtbogensysteme eine gezielte Anpassung zur Optimierung der Plasmaströmung im Lichtbogenführenden Bereich.

6 Anhang

6.1 Verzeichnis der verwendeten Symbole

Symbol	Bedeutung	Wert	Einheit
A	Querschnittsfläche		mm^2
A_{KB}	Messfläche an dem Kathodenboden		mm^2
A_{KS}	Messfläche an der Kathodenspitze		mm^2
c	Lichtgeschwindigkeit	$2,99792458 \cdot 10^8$	m/s
c_{p_w}	Spezifische Wärmekapazität des Wassers	4187	J/kg K
e	Elementarladung	$1,602177 \cdot 10^{-19}$	C
ε	Emissionskoeffizient		-
ε_0	Dielektrizitätskonstante	$8,854 \cdot 10^{-12}$	C/Vm
\vec{e}_z	Einheitsvektor der z-Achse		-
h	Plancksches Wirkungsquantum	$6,6260693 \cdot 10^{-34}$	Js
I	Strom		I
\tilde{I}	Teilstrom		A
$I_{1,i,j}, I_{2,i,j}$	Bildpunktintensitäten	0..255	Grauwert
k	Boltzmann Konstante	$1,380658 \cdot 10^{-23}$	J/K
κ	Leitfähigkeit		S/m
l_p	Länge eines Partikelstreifens		Pixel
λ	Wellenlänge		nm
λ_w	Wärmeleitfähigkeit		W/mK
Λ	Coulomb-Logarithmus		-
M	Abbildungsmaßstab		m/Pixel

m_A	Masse des injizierten Pulvers		kg
m_e	Ruhemasse des Elektrons	$9,1093897 \cdot 10^{-37}$	kg
m_i	Ionenmasse		kg
m_G	Masse der abgeschiedenen Schicht		kg
\dot{m}_{KS}	Kühlwasserfluss pro Anode		kg/s
\dot{m}_G	Gesamtkühlwasserfluss		kg/s
η_P	Viskosität		m ² /s
ω_D	Winkelgeschwindigkeit		1/s
P	Strahlungsleistung		W
p_A	Leistungsanteil der Anodenkühlung an der Gesamtkühlung		%
P_E	Elektrische Leistung		W
P_{T_A}	Verlustleistung der Anode		W
P_{KG}	Gesamtkühlleistung		W
P_{KS}	Kühlleistung an den Anoden		W
ϕ	Detektionswinkel		°
Φ	Wärmestrom		W
r^*	Differentielle Widerstand des Lichtbogens		Ω
R_A	Ersatzwiderstand		Ω
ρ	Dichte		kg/m ³
T	Tastverhältnis		%
T_e	Elektronentemperatur		K
t_K	Belichtungszeit		s
T_P	Plasmatemperatur		K
\overline{T}_{KB}	Temperaturverteilung am Kathodenboden		°C

\overline{T}_{KS}	Temperaturverteilung an der Kathodenspitze		°C
ΔT_{KS}	Temperaturerhöhung des Kühlwassers an einem Anodensegment		K
U	Spannung		V
$U_{KA_{1-3}}$	Spannungen zwischen Kathode und Anoden		V
U_{KH}	Spannung zwischen Kathode und Hilfsanode		V
V_F	Floatingpotential		V
V_P	Plasmapotential		V
v_P	Partikelgeschwindigkeit		m/s
v_z	Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung		m/s
\vec{v}	Geschwindigkeitsvektor		m/s
$\langle v_1 \rangle$	Mittlere Geschwindigkeit		m/s
Z	Ionisationsstufe		-

6.2 Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
CT	Computer Tomografie
DC	Direct Current (Gleichstrom)
DE	Deposition Efficiency (Auftrags-wirkungsgrad)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LDA	Laser Doppler Anemometrie
PFI	Particle Flux Imaging
PVI	Particle Velocity Imaging

6.3 Literaturverzeichnis

- / 1 / P. Heinrich, Penszior Ch., Meinaß H.: Gase zum Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, Proceedings of 4th Kolloquium Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, Erding (1997)
- / 2 / Linde, Thermal Spraying Processes changing in time, Poster <http://www.linde-gas.de>, 2005
- / 3 / R. Zeller: Untersuchung zur Qualifizierung des Plasmaspritzens, Dissertation Erlangen (1997)
- / 4 / J.M. Houben: Relation of the adhesion of plasma sprayed coatings to the process parameters size, velocity and heat content of the spray particles, Doctor Thesis, Eindhoven University of Technology (1988)
- / 5 / U. Eritt: Entwicklung und Validierung von Simulationsmodellen zur Optimierung der Prozessführung bei der Herstellung plasmagespritzter Wärmedämmschichtsysteme, Dissertation RWTH- Aachen (1999)
- / 6 / W. Rieder: Plasma und Lichtbogen, Friedr. Vieweg & Sohn Braunschweig 1967
- / 7 / H. Marchandise: Plasmatechnologie-Grundlagen und Anwendung, Brüssel (1969)
- / 8 / H. Hess: „Der elektrische Durchschlag in Gasen“, 1976, Akademie Verlag.
- / 9 / G. Busz und W. Finkelnburg, „Thermische Lichtbögen hoher Temperatur und niedriger Brennspannung“, Zeitschrift für Physik, Bd 139, S.212-225, 1954.
- / 10 / J. Heberlein, M. Vysohlid: Investigation of arc voltage fluctuations in a plasma torch operated with Ar/H₂, Proceedings of the 2004 International Thermal Spray Conference, Osaka (CD edition)
- / 11 / Patent: DE 4105407A1: Plasmaspritzgerät zum Versprühen von festem, pulverförmigen oder gasförmigem Material, 1991
- / 12 / P. Haslbeck: Entwicklung eines Dreikathoden-Plasmaspritzbrenners unter Anwendung adaptierter plasmadiagnostischer Methoden, Dissertation UniBw- München (1995)

- / 13 / J. Zierhut: Entwicklung von Diagnostikverfahren zur Optimierung von Plasmaspritzsystemen, Dissertation; Universität der Bundeswehr München (2000)
- / 14 / M. Dzulko, G. Forster, K.D. Landes, J. Zierhut, K. Nassenstein: Plasma Torch Developments, Proceedings of the International Thermal Spray Conference, Basel (2005)
- / 15 / K.D. Landes, G. Forster, J. Zierhut, M. Dzulko, D. Hawley: Computer Tomography of Plasma Jets – Applied on a TRIPLEX II torch, Proceedings of the 2004 International Thermal Spray Conference, Osaka (CD edition)
- / 16 / <http://www.sulzernetco.com>
- / 17 / S. Glasstone, R.H. Lovberg: Kontrollierte thermonukleare Reaktionen, Karl Thiemig KG, München 1964
- / 18 / J.B. Wilkinson, D.R. Milner: Heat Transfer from Arcs, Brit. Welding J., Vol7, No.2, 1960
- / 19 / Heberlein: Electrode Phenomena in Plasma Torches: Annals of the New York Academy of Sciences (1999)
- / 20 / K. Kirner: Zu den Vorgängen an Kathoden, insbesondere an Plasmabrennerkathoden, Schweißen und Schneiden, DVS- Bericht 45 (1993)
- / 21 / P. Eichert, Coddet C.: On the Modeling Approach of DC Plasma Flows by Implementation of the CFD Phoenix Code, Thermal Spray (1996)
- / 22 / F. Blein, E. Roussel, A. Freslon: Experimental Design Based on McLean & Anderson Modeling Applied to the Prediction of Plasma Properties, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference, Nice (1998)
- / 23 / I. Choquet, S. Björklund, J. Johansson, J. Wilgren: Nozzle exit geometry and lump formation in APS, Proceedings of the International Thermal Spraying Conference Basel (2005)
- / 24 / A. Schwenk: Entwicklung und Erprobung neuartiger Düsen für das atmosphärische Plasmaspritzen, Dissertation Chemnitz (2005), ISSN 1439-1597

- / 25 / S. Zimmermann, K.D. Landes: Moderne lasergestützte Partikeldiagnostikverfahren beim thermischen Spritzen, 7. Werkstoffwissenschaftliches Kolloquium (TU Chemnitz)
- / 26 / K.D. Landes, J. Zierhut, W. Krömmer: Strahl- und Partikeldiagnostik beim thermischen Spritzen; 5. Kolloquium Hochgeschwindigkeitsflammspritzen, Erding (2000)
- / 27 / J. Zierhut, U. Eritt, E. Lugscheider, K.D. Landes, R. Hartmann: Characterization of an atmospheric spray system for use in coating technology: numerical modeling and LDA investigations of plasma flow fields and particle distribution, Proceedings of the 14th International Symposium on Plasma Chemistry, Prag (1999)
- / 28 / M. Boulos, P. Fauchais, E. Pfender, „Thermal Plasmas - Fundamentals and applications“.
- / 29 / A.C. Kak und M. Slaney: Principles of Computerized Tomography. New York: IEEE Press, 1987
- / 30 / E. Pfender, W.L.T Chen, R. Spores: A new look at the thermal and gas dynamic characteristics of a plasma jet, Thermal Spray Conference, Long Beach, CA, USA, 1990
- / 31 / R.H. Henne, J. Arnold, G. Schiller: Improvement of DC thermal plasma spraying by reducing the cold gas entrainment effect, Proceedings of the International Thermal Spraying Conference Basel (2005)
- / 32 / G. Kraut: Pyrometrie der Oberflächentemperatur dotierter Kathoden, Dissertation UniBw- München (1999)
- / 33 / R. Britzen: Entwicklung und Realisierung einer mikrocontrollerbasierten Pulssteuerung für die Plasmaquelle DeltaGun, Diplomarbeit UniBw-München (2004)
- / 34 / M. Dzulko, K.D. Landes, J. Zierhut: Delta-Gun: Ergebnisse, Anwendungsfelder und Perspektiven; 3.GTV Kolloquium (2006), ISSN 160-0530

6.4 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1: Funktionsprinzip der Thermischen Beschichtung.....	9
Abb. 2: Übersicht verschiedener thermischer Beschichtungsprozesse	10
Abb. 3: Prinzip eines DC-Plasmagenerators.....	15
Abb. 4: Prinzipieller Potentialverlauf U_B eines Lichtbogens zwischen Kathode und Anode	15
Abb. 5: Typische Kennlinie elektrischer Gasentladungen (Edelgas bei $p=1$ mbar, Elektrodenabstand $d=10$ cm).....	16
Abb. 6: Strom-Spannungskennlinie des elektrischen Lichtbogens im Industriebrenner Typ F4 der Fa. Sulzer Metco (30slpm Ar, $p=1$ bar)	17
Abb. 7: Strom-Spannungskennlinien eines elektrischen Lichtbogens (Industriebrenner Typ F4 der Fa. Sulzer Metco, mit Stickstoff als Zumischung zum Plasmagas Ar, $p=1$ bar).....	19
Abb. 8: Prinzip eines Einlichtbogensystems (Typ Sulzer Metco F4)	20
Abb. 9: Schema des Mehrkathodenbrennersystems TRIPLEX	22
Abb. 10: „Cage“-Effekt für dreifach symmetrische Lichtbogensysteme	23
Abb. 11: Parameterabhängige Winkellage der Dreifachsymmetrie des Plasmafreistrahls eines Triplex II Brenners (Düse 9 mm)	24
Abb. 12: Prinzipieller Aufbau eines Mehranodensystems	26
Abb. 13: Stromabhängigkeit der von den Plasmageneratoren F4 und „Delta-Gun“ aufgenommenen elektrischen Leistung (60 slpm Argon).....	27
Abb. 14: Schematische Darstellung der elektrischen Beschaltung des „Delta Gun“ mit Zündvorrichtung.....	27
Abb. 15: Elektrische Leistung des Plasmagenerators „Delta-Gun“ in Abhängigkeit von Strom und Plasmagasfluss (Argon, Düse 7mm).....	29
Abb. 16: Zeitverlauf der Teilspannungen $U_{KA_{1-3}}$ zwischen Kathode und Anoden beim Plasmagenerator „Delta-Gun“ (Plasmagas: 40 slpm Ar, Strom: 200 A).....	31
Abb. 17: Schematische Darstellung der Lichtbogenverteilung des Plasmagenerators „Delta-Gun“	31
Abb. 18: Fluktuationen der Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ zwischen Kathode und Anoden.....	32
Abb. 19: Beschaltung der Elektroden zur Durchführung der Potentialmessung	32
Abb. 20: Zeitverläufe der Kathoden – Anoden Spannungen $U_{KA_{1-3}}$ und der Spannung U_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode bei dem Plasmagenerator „Delta-Gun“ (200 A, 20 slpm Ar)	34
Abb. 21: Mittelwert (blau) und Schwankungsbreite (rot) der Spannung U_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode in Abhängigkeit des Plasmagasflusses ($I = 200$ A).....	35
Abb. 22: Verschiedene Kathodenformen zur Überprüfung der Spannungsschwankungen ΔU_{KH} zwischen Kathode und Hilfsanode	35
Abb. 23: X-Pinch Effekt der Lichtbogensäule.....	36
Abb. 24: Spannung U_{KA} zwischen Kathode und Anodensegmenten in Abhängigkeit vom Plasmagasfluss (Parameter $I = 200$ A)	37

Abb. 26: Anfallende Kühlleistung P_{KS} eines Anodensegmentes in Abhängigkeit von der elektrische Leistung P_E (Parameter: Plasmagas 50 slpm Ar).....	39
Abb. 27: Kathode und Kathodenhalterung mit Messbohrung	40
Abb. 28: Temperaturverteilung $\overline{T_{KS}}$ der Messfläche A_{KS} in Nähe der Kathodenspitze.....	41
Abb. 29: Maximale Temperaturen \hat{T}_{KS} und \hat{T}_{KB} der Messflächen A_{KS} und A_{KB} als Funktion des Betriebsstromes.....	42
Abb. 30: Wärmestrom Φ der Kathode als Funktion des Generatorstroms I	43
Abb. 31: Mikroskopaufnahmen der „Delta-Gun“- Kathode nach 50 Betriebsstunden bei einer Brennerleistung von 40 kW	43
Abb. 32: Mikroskopaufnahmen einer „F4“- Kathode nach 50 Betriebsstunden bei einer Brennerleistung von 40 kW.....	44
Abb. 33: Messingrohre kombinieren Strom- und Wasserführung im Inneren des „Delta-Gun“ Generators.....	47
Abb. 34: Auswechseln der Düseneinheit beim „Delta-Gun“	48
Abb. 35: Kathoden-Schnellwechseleinheit	48
Abb. 36: Pulver-Injektionseinheit mit Fixierungs-Nuten.....	49
Abb. 37: Schematische Meßanordnung der Emissionsspektroskopie mit tomografischer Datenaufnahme	53
Abb. 38: Tomogramm einer Dreifachintensitätsverteilung als Matrix \overline{M}_λ (Parameter: Wellenlänge λ).....	54
Abb. 39: Beitrag der lokalen Emission $\mathcal{E}_{i,j}(\lambda)$ des Teilvolumens $\Delta z \cdot A_{i,j}$ aus dem Plasmastrahlschnittvolumen ΔV zum Meßsignal $M(n, k, l)$	56
Abb. 40: Tomografische Datenaufnahme und Auswertung für konstante Wellenlänge λ (entspricht festem Parameter l)	58
Abb. 41: Rekonstruierte Plasmastrahlemission („Delta-Gun“, 7 mm Düse, 2 mm vom Düsenausgang, Leistung 23 kW, 17 slpm Ar)	59
Abb. 42: Rekonstruierte Plasmastrahlemission mit Intensitätskonturen („Delta-Gun“, 7 mm Düse, 2 mm vom Düsenausgang, Leistung 23 kW, 17 slpm Ar)	59
Abb. 43: Schematische Darstellung einer intensivierten Kamera.....	60
Abb. 44: Schematischer Aufbau für die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen.....	61
Abb. 45: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines F4-Plasmagenerators, Belichtungszeit: 5 ns, $\Delta t = 18 \mu s$ (Parameter: 6mm Düse, Strom: 540 A, Plasmagas: 45 slpm Ar, 12 slpm N ₂)	62
Abb. 46: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines Triplex II-Plasmagenerators, Belichtungszeit: 3 ns, $\Delta t = 18 \mu s$ (Parameter: 9 mm Düse, Strom: 350 A, Plasmagas: 45 slpm Ar)	63
Abb. 47: Hochgeschwindigkeitsaufnahme eines „Delta-Gun“-Plasmagenerators, Belichtungszeit: 1 ns, $\Delta t = 18 \mu s$ (Parameter: 7 mm Düse, Strom: 330 A, Plasmagas: 50 slpm Ar)	63
Abb. 48: Prinzip der Bildaufnahme des Diagnostikverfahrens PFI.....	64
Abb. 49: Ellipsenkenngrößen (x, y, a, b, α) des PFI-Meßsystems	65
Abb. 50: Plancksches Strahlungsspektrum für Temperaturen von 100 K bis 10000 K.....	66

Abb. 51: Volumenpyrometriemessung „Delta-Gun“	68
Abb. 52: Variationen der Pulverinjektorposition	69
Abb. 53: Änderung der Partikelstrahllänge in Abhängigkeit der Injektorposition	70
Abb. 54: Auswertung der leuchtenden Partikelstreifen	71
Abb. 55: Softwareoberfläche des PVI Messsystems.....	72
Abb. 56: Mittlere Partikelgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Düsenabstand (Parameter: 7 mm Düse, 50 slpm Ar, 50 kW, Pulver Al ₂ O ₃ –45 +20 µm).....	73
Abb. 57: Relative Dichteverteilung der Partikel (Parameter: 7 mm Düse, 50 slpm Ar, 50 kW, Pulver Al ₂ O ₃ –45 + 20 µm).....	74
Abb. 58: Lichtbogenentladung im „Delta-Gun“-Generator mit bestehendem und unterbrochenem Teilstrom....	75
Abb. 59: Schematische Darstellung der elektrischen Beschaltung zur Modulation der anodischen Teillichtbögen	76
Abb. 60: Relative Änderung der Ellipsenachsen a und b in Abhängigkeit des Tastverhältnis (Parameter: Strom: 280A, Plasmagas: 50Ar, Pulvereingabe: Einzelinjektor).....	77
Abb. 61: Querschliff einer Chromoxid (Cr ₂ O ₃)-Probeschicht	79
Abb. 62: Querschliff einer Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)-Probeschicht	79