

Konturgenaue Bauteilbeschichtung für den Verschleißschutz mittels Atmosphärischen Plasmaspritzens und Lichtbogenspritzens

Von der Fakultät Maschinenbau
der TU Dortmund
zur Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Phys.Ing. Benjamin Krebs
aus Essen-Heisingen

Eingereicht am:	16. Februar 2011
Mündliche Prüfung:	17. Juni 2011
Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann
Mitberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-8027-8812-3

Danksagung

Die vorliegende Arbeit ist neben meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der Technischen Universität Dortmund entstanden.

Mein herzlichster Dank geht an meinen Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.Ing. Wolfgang Tillmann für seine stete Förderung und Unterstützung meiner wissenschaftlichen Entwicklung sowie für die Bereitstellung der Thematik dieser Dissertation.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und die kritische Durchsicht meiner Dissertation.

Ich danke allen Kollegen aus dem Sonderforschungsbereich 708, die an dem Gelingen dieser Arbeit direkt oder indirekt mitgewirkt haben. Namentlich zu erwähnen sind die Herren Dipl.-Inform. Carsten Scheele für die Unterstützung bei der Planung und Durchführung der robotergestützten Beschichtungsversuche, Dipl.-Inform. Alexander Kout für die Generierung der Spritzbahnen zur Beschichtung von komplexen Bauteilen, Dipl.-Inform. Thomas Wiederkehr für die vielen fachlichen Diskussionen aus denen einige Ideen dieser Dissertation entstanden sind und Dipl.-Ing. Achim Peuker für die frästechnische Bearbeitung der komplexen Geometrien. Ohne ihr Mitwirken wäre die Arbeit in diesem Umfang nicht möglich gewesen.

Weiterhin möchte ich allen wissenschaftlichen Angestellten des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie und insbesondere den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Thermisches Spritzen danken. Durch ihre nette und offene Art haben sie mir bei der Lösung so manch eines scheinbar unlösbaren Problems geholfen. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Ingor Baumann, Dipl.-Ing. Jan Nebel und Dipl.-Ing. Lukas Wojarski für die vielen fachlichen Diskussionen und Anregungen zu dieser Arbeit, bei Herrn Dr.-Ing. Ralf Rechlin für die praktische Unterstützung bei der Durchführung der Experimente und bei Frau Dr. Iris-Aya Laemmerhirt für die sorgfältige sprachliche Korrektur der Arbeit. Auch möchte ich mich bei allen technischen Angestellten des

Lehrstuhls für Werkstofftechnologie bedanken. Mein besonderer Dank gilt den Angestellten des Metallographielabors Volker Brandt, Björn Starsinki und Ingo Schäper für ihre Mithilfe bei der Untersuchung der Beschichtungen.

Außerdem danke ich allen studentischen Hilfskräften und Studenten, die an der experimentellen Erstellung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Ein ganz besonderer Dank geht hierbei an die Herren Daniel Bebko, Thai Dang, Björn Holk, Dipl.-Wirt.-Ing. Hendrik Schleining und Dipl.-Wirt.-Ing. Eduard Essert.

Abschließend möchte ich meiner Mutter dafür danken, dass sie mir die Möglichkeit gegeben hat, studieren zu gehen und anschließend die Promotion anzustreben sowie meiner Freundin Friederike Ascherfeld für ihre liebevolle Unterstützung während meiner gesamten Promotionsphase.

Benjamin Krebs

Dortmund, Juli 2011

Kurzfassung

Die Thermische Spritztechnik ist seit vielen Jahren ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten auf großflächigen ebenen oder radialsymmetrischen Bauteilen. In jüngster Zeit werden zudem vermehrt Bauteile mit einer komplexen oder sogar freigeformten Kontur beschichtet. Auf diesen Bauteilen lässt sich ein gutes Beschichtungsergebnis nur unter Berücksichtigung aller relevanten Einflußgrößen im Spritzprozess wie der Prozessparameter, der Handhabung der Spritzpistole und der Dynamik des Beschichtungsroboters erzielen. Die vorliegende Arbeit greift diese Problematik auf. Für die Thermischen Spritzprozesse Atmosphärisches Plasmaspritzen und Lichtbogenspritzen wird ein ganzheitliches Konzept zur Herstellung endkonturnaher, hochqualitativer Beschichtungen auf beliebig geformten Bauteiloberflächen unter Einsatz karbidischer Spritzzusätze für den Verschleißschutz entwickelt.

Zunächst werden Prozessparameterstudien zur Herstellung von Spritzschichten mit einer dichten und homogenen Morphologie, einer glatten Topographie, einer guten adhäsiven und kohäsiven Schichthaftung sowie einer geringen thermischen Zersetzung der Karbide vorgestellt. Die Schichtqualität wird dabei anhand verschiedener mikrostruktureller und topographischer Eigenschaften der Beschichtung bewertet. Anschließend werden die signifikanten Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Bauteile ermittelt und Gemeinsamkeiten sowie grundlegende Unterschiede zwischen den Spritzverfahren herausgearbeitet. Zudem werden empirische Modelle zur Vorhersage von Auftragsraten bei Variation der Handhabungsparameter aufgestellt. Die gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend gezielt genutzt, um mit dem Lichtbogenspritzprozess verschiedene regelgeometrische Demonstratorbauteile sowie ein reales Werkzeug für die Umformtechnik endkonturnah zu beschichten. Hierbei zeigen sich die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Bahnstrategien sowie die grundsätzlichen Möglichkeiten der Bauteilbeschichtung.

Abstract

The Thermal Spray Technology has been an established method for the production of wear- and corrosion-resistant coatings on large even or radially symmetrically components. However, in recent years the number of complex or freeformed components to be coated has increased significantly. To achieve high quality coatings on these components all relevant parameters such as the process variables, the handling of the spray torch and the dynamic of the coating robot need to be taken into consideration carefully. The present work focuses on this problem by developing concepts for spraying near-net-shape, high quality coatings on arbitrary-formed components by means of the Thermal Spray Processes Atmospheric Plasma Spraying and Twin Wire Arc Spraying with metal matrix composite feedstocks.

At first, process parameter studies are introduced, which are utilized in order to produce coatings with a dense and homogenous microstructure, a smooth surface, a good adhesion and cohesion, as well as a low thermal degradation of the carbides. The coating quality is evaluated by means of various microstructural and topographical coating characteristics. Afterwards, the most significant influencing parameters during the coating of complex components are identified and commonalities as well as fundamental differences between the two spraying processes are worked out. Furthermore, empirical models are set up in order to describe the deposition rate as a function of the various handling parameters. Finally, the knowledge gained by these studies is applied to coat various geometrical demonstrator components as well as a actual forming tool. These experiments demonstrate the assets and drawbacks of different path strategies as well as the possibilities of component coatings.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	5
2.1	Thermisches Spritzen	5
2.2	Verfahren des Thermischen Spritzens	7
2.2.1	Atmosphärisches Plasmaspritzen	9
2.2.2	Lichtbogenspritzen	12
2.3	Eigenschaften des Thermischen Spritzprozesses	14
2.3.1	Vorgänge im Thermischen Spritzprozess	14
2.3.2	Mikrostrukturelle Eigenschaften Thermischer Spritzschichten . .	16
2.4	Optimierung Thermischer Spritzschichten	19
2.5	Beschichtung komplexer Bauteile	21
2.5.1	Spritzwinkel	24
2.5.2	Spritzabstand	28
2.5.3	Bahnabstand	31
2.5.4	Verfahrgeschwindigkeit	33
2.5.5	Bauteilkontur	34
2.5.6	Bahnstrategie	36
2.5.7	Fazit	38
3	Schlussfolgerung und Zielsetzung	39

4	Experimentelles	43
4.1	Erklärung der Vorgehensweise	43
4.2	Thermisches Spritzen	46
4.2.1	Grundwerkstoff	46
4.2.2	Probenvorbehandlung	46
4.2.3	Verfahrkinematik	46
4.2.4	Thermische Spritzverfahren	47
4.3	Spritzzusätze	48
4.3.1	WC-12Co	48
4.3.2	WSC-Fe	50
4.4	Untersuchungsmethoden	51
4.4.1	Lichtmikroskopie	51
4.4.2	Rasterelektronenmikroskopie	52
4.4.3	Rauheitsmessung	53
4.4.4	Härtebestimmung	53
4.4.5	Optische 3D-Profilometrie	54
4.4.6	Röntgendiffraktometrie	54
4.4.7	Haftzugprüfung	54
4.4.8	Spannungsmessung	55
4.4.9	Partikeltemperatur- und geschwindigkeit	55
4.5	Versuchsprogramm	56
4.5.1	Prozessparameterstudien	56
4.5.1.1	Statistische Versuchsplanung (WC-12Co)	56
4.5.1.2	Klassische Versuchplanung (WSC-Fe)	59
4.5.2	Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Geometrien	60
4.5.2.1	Untersuchung des Spritzwinkels	60
4.5.2.2	Untersuchung des Spritzabstandes, des Bahnabstandes und der Verfahrensgeschwindigkeit	62

4.5.2.3	Kombination von Bahnplanungsparametern	63
4.5.2.4	Untersuchung des Einflusses der Bauteilkontur und der Bahnstrategie	63
4.5.3	Beschichtung komplexer Geometrien	64
5	Prozessparameterstudien zur Optimierung von Schichtsystemen	67
5.1	Optimierung des Schichtsystems WC-12Co	68
5.1.1	Einfluss der Prozessparameter auf Schichteigenschaften	68
5.1.2	Modellbildung und Evaluation des Modells	74
5.1.3	Fazit	80
5.2	Optimierung des Schichtsystems WSC-Fe	80
5.2.1	Primärgas	81
5.2.2	Sekundärgas	84
5.2.3	Spannung	87
5.2.4	Strom	90
5.2.5	Fazit	93
5.3	Schlussfolgerung	94
6	Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Geometrien	95
6.1	Spritzwinkel	96
6.1.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	96
6.1.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	102
6.1.3	Diskussion der Ergebnisse	108
6.2	Spritzabstand	113
6.2.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	113
6.2.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	116
6.2.3	Diskussion der Ergebnisse	121
6.3	Bahnabstand	129
6.3.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	129
6.3.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	130

6.3.3	Diskussion der Ergebnisse	134
6.4	Verfahrgeschwindigkeit	140
6.4.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	140
6.4.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	143
6.4.3	Diskussion der Ergebnisse	144
6.5	Kombination von Bahnplanungsparametern	147
6.5.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	148
6.5.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	148
6.5.3	Diskussion der Ergebnisse	150
6.6	Bauteilgeometrie	152
6.6.1	Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co	152
6.6.2	Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe	155
6.6.3	Diskussion der Ergebnisse	159
6.7	Bahnstrategie	161
6.8	Schlussfolgerung	164
7	Beschichtung komplexer Bauteile	167
7.1	Regelgeometrische Bauteile	168
7.1.1	Außenwinkel	168
7.1.2	Innenradius	176
7.2	Umformwerkzeug	183
7.3	Fazit	194
8	Zusammenfassung und Ausblick	197

Abbildungsverzeichnis

2.1	Thermische Spritzprozesse nach DIN EN 657	8
2.2	Vergleich der gebräuchlichsten Spritzverfahren in Abhängigkeit der Partikeltemperatur und der Partikelgeschwindigkeit im Spritzprozess	8
2.3	Schematische Darstellung eines Atmosphärischen Plasmaspritzprozesses	10
2.4	Schematische Darstellung eines Lichtbogenspritzprozesses	12
2.5	Schematische Darstellung des Spritzwinkels α	24
2.6	Schematische Darstellung des Spritzabstandes S	28
2.7	Schematische Darstellung der Temperatur und Geschwindigkeit der Plasmaflamme und der Spritzpulver beim Plasmaspritzen als Funktion des Spritzabstandes [SALK08].	29
2.8	Schematische Darstellung des Bahnabstandes B	31
2.9	Schematische Darstellung der Verfahrensgeschwindigkeit $V = V_{brenner} + V_{substrat}$	33
4.1	Schematische Darstellung des experimentellen Versuchsplans	45
4.2	Technische Daten des a) DC Plasmabrenners Sulzer Metco F4-MB und b) des Lichtbogenbrenners Sulzer Metco Smart Arc	47
4.3	REM Aufnahmen des agglomeriert und gesinterten WC-12Co Pulvers, a) Übersicht, b) Querschliff durch ein Pulverkorn	48
4.4	Partikeldurchmesserverteilung des WC-12Co Pulvers	48
4.5	Partikeldurchmesserverteilung der Karbidfüllung im WSC-Fe Spritzdraht	50
4.6	Lichtmikroskopische Aufnahmen eines WSC-Fe Fülldrahtes, a) Übersichtsaufnahme, b) Detailaufnahme der WSC Füllung	51

4.7	Ermittlung des Anteils an geschmolzenen Karbiden im WC-12Co Schichtgefüge mittels Rasterelektronenmikroskopie. a) Rückstreubild, b) markierter Anteil an geschmolzenen Karbiden	52
4.8	Schematische Darstellung eines exscribed Central Composite Designs mit drei Prozessparametern	57
4.9	Schematische Darstellung eines Beschichtungsvorgangs	61
4.10	Experimentell gemessenes Spritzprofil und eine gaußsche Anpassung des Profils (WC-12Co, $\alpha = 90^\circ$)	62
4.11	Eingesetzte Bahnstrategien zur Beschichtung von regelgeometrischen Bauteilen, a) vertikale Bahnstrategie, b) horizontale Bahnstrategie	64
4.12	Offline-Programmierung des Beschichtungspfades in der Software Robotstudio 5.13 anhand eines Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ [ABB10]	66
5.1	Pareto Diagramme a) der Partikeltemperatur und b) der Partikelgeschwindigkeit von WC-12Co Schichten	69
5.2	a) Pareto Diagramm des Anteils der geschmolzenen Karbide in plasmagespritzten WC-12Co Schichten, b) Anteil der geschmolzenen Karbide als Funktion des Gasdurchsatzes	70
5.3	REM Detailaufnahmen von WC-12Co Schichten, hergestellt mit einem Gasdurchsatz von a) 621/min, b) 721/min, c) 821/min	70
5.4	Pareto Diagramme a) der Porositäts- und b) der Rauheitsmessungen für das Schichtsystem WC-12Co	71
5.5	Lichtmikroskopische Aufnahmen plasmagespritzter WC-12Co Schichten bei einem Gasdurchsatz von a) 621/min, b) 721/min, c) 821/min . .	72
5.6	Pareto Diagramme a) der Mikrohärte und b) der Spannung in einer Tiefe von $200 \mu\text{m}$	73
5.7	Pareto Diagramme a) der Auftragsrate und b) der Haftzugfestigkeit . . .	74
5.8	Konturdiagramm der a) Porosität, b) der Rauheit R_z , c) der Auftragsrate und d) des Anteils geschmolzener Karbide. Die weißen Punkte repräsentieren die Punkte des Central Composite Designs. Das schwarze Kreuz ist das berechnete Optimum.	76
5.9	Evaluation der Modellierung der Schichteigenschaften durch Gegenüberstellung der vorhergesagten Werte und der beobachteten Werte für a) die Partikeltemperatur und b) die Porosität	77

5.10	Konturdiagramme der Wünschbarkeitsfunktionen für die Porosität. Wünschbarkeit als Funktion a) des Gasdurchsatzes und des Verhältnisses Ar/H_2 , b) des Spritzabstandes und der Pulverförderrate, c) der Pulverförderrate und des Verhältnisses Ar/H_2 , d) der Pulverförderrate und des Gasdurchsatzes, e) des Spritzabstandes und des Verhältnisses Ar/H_2 , f) des Spritzabstandes und des Gasdurchsatzes	79
5.11	a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Primärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe .	82
5.12	a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion des Primärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe	83
5.13	Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 2 bar, b) 4 bar und c) 6 bar Primärgasdruck hergestellt wurden ($I = 200$ A, $U = 32$ V, $SG = 0$ bar)	83
5.14	Auftragsrate als Funktion des Primärgasdruckes für das Schichtsystem WSC-Fe	84
5.15	a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Sekundärgases und des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	85
5.16	a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion des Sekundärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe	86
5.17	Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 0 bar, b) 2 bar und c) 4 bar Sekundärgasdruck hergestellt wurden ($I = 220$ A, $U = 32$ V, $PG = 6$ bar)	86
5.18	Auftragsrate als Funktion des Sekundärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe	87
5.19	Einschnürung des Spritzstrahls durch Einsatz des Sekundärgases	87
5.20	a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion der Spannung für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	88
5.21	a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion der Spannung für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	89
5.22	Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 28 V, b) 30 V und c) 32 V Spannung hergestellt wurden ($I = 260$ A, $PG = 6$ bar, $SG = 4$ bar)	89

5.23	Auftragsrate als Funktion der Spannung für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	90
5.24	a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	91
5.25	a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	92
5.26	Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 200 A, b) 220 A und c) 260 A Strom hergestellt wurden ($U = 32$ V, $PG = 6$ bar, $SG = 4$ bar)	92
5.27	a) Auftragsrate und b) Anstieg der Substrattemperatur in einem Beschichtungsvorgang $\Delta T_{Substrat}$ als Funktion des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	93
6.1	Gemessenes Spritzprofil der plasmagespritzten WC-12Co Schichten und Anpassung mit einer Gaußverteilung bei den Spritzwinkeln $\alpha =$ a) 90° , b) 80° , c) 70° , d) 60° , e) 50° , f) 40° , g) 30°	97
6.2	a) Auftragsrate, b) Halbwertsbreite, c) Kurtosis, d) Schiefe von plasmagespritzten WC-12Co Schichten. Alle Parameter wurden über Gaußanpassungen ermittelt	99
6.3	a) Auftragswirkungsgrad, b) Porosität, c) Rauigkeit, d) Mikrohärtigkeit, d) Haftzugfestigkeit als Funktion des Spritzwinkels für plasmagespritzte WC-12Co Schichten	101
6.4	Lichtmikroskopische Querschliffe von WC-12Co Schichten, die mit einem Spritzwinkel von a) 90° , b) 60° , c) 30° hergestellt wurden	102
6.5	Gemessenes Spritzprofil der lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten und Anpassung mit einer Gaußverteilung bei den Spritzwinkeln $\alpha =$ a) 90° , b) 80° , c) 70° , d) 60° , e) 50° , f) 40° , g) 30°	103
6.6	a) Auftragsrate, b) Halbwertsbreite, c) Kurtosis, d) Schiefe von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten. Alle Parameter wurden über Gaußanpassungen ermittelt	105
6.7	a) Auftragswirkungsgrad, b) Porosität, c) Rauigkeit, d) Mikrohärtigkeit, d) Haftzugfestigkeit als Funktion des Spritzwinkels für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten	106

6.8	Lichtmikroskopische Querschliffe von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten, die mit einem Spritzwinkel von a) 90°, b) 60°, c) 30° hergestellt wurden	107
6.9	Schematische Darstellung des Einflusses des Spritzwinkels auf die Änderung des Spritzprofils	109
6.10	Experimenteller Aufbau bei der Untersuchung des Spritzwinkels. Eine rechtwinkelige Pulvereindüsung in die Plasmaflamme bewirkt einen schrägen Spritzstrahl	110
6.11	Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spritzwinkel und Schichtstruktur von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten. a) Poröse Regionen in abgeschatteten Bereichen bei $\alpha \geq 50^\circ$, b) Einzelne Schichtaufwerfungen bei $\alpha < 50^\circ$	112
6.12	a) Auftragsrate, b) Porosität, c) Mikrohärtigkeit, d) Kleinlasthärtigkeit und e) Rauheit R_Z als Funktion des Spritzabstandes für plasmagespritztes WC-12Co	115
6.13	Darstellung des Oberflächenprofils von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten, Spritzabstand $S =$ a) 50 mm, b) 80 mm, c) 115,85 mm, d) 150 mm, e) 180 mm	117
6.14	Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten bei einem Spritzabstand von a) 80 mm, b) 110 mm und c) 150 mm	118
6.15	a) Auftragsrate, b) Porosität, c) Mikrohärtigkeit, d) Kleinlasthärtigkeit und e) Rauheit R_Z als Funktion des Spritzabstandes für lichtbogengespritztes WSC-Fe	119
6.16	Darstellung des Oberflächenprofils von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten, Spritzabstand $S =$ a) 50 mm, b) 80 mm, c) 100 mm, d) 120 mm, e) 150 mm	120
6.17	Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei einem Spritzabstand von a) 80 mm, b) 110 mm und c) 150 mm	121
6.18	Theoretische Schichtdicke von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten bei den Spritzabständen a) 80 mm und b) 180 mm. Die Berechnung erfolgte anhand einer Akkumulation von einzelnen Spritzprofilen.	122

6.19 a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Spritzabstandes für plasmagespritztes WC-12Co und lichtbogengespritztes WSC-Fe	124
6.20 Mittels Rasterelektronenmikroskopie (Rückstreuelektronenmodus) ermittelter Anteil an geschmolzenen Karbiden im Schichtsystem WC-12Co als Funktion des Spritzabstandes	125
6.21 Röntgenographische Phasenanalyse der Schichtsysteme a) WC-12Co und b) WSC-Fe bei verschiedenen Spritzabständen	127
6.22 Einfluss des Bahnabstandes auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_Z von plasmagespritzten WC-12Co Schichten	131
6.23 Darstellung des Oberflächenprofils von plasmagespritzten WC-12Co Schichten, Bahnabstand $B =$ a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm, d) 9 mm, e) 11 mm	132
6.24 Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten bei einem Bahnabstand von a) 3 mm, b) 7 mm und c) 11 mm	133
6.25 Einfluss des Bahnabstandes auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_Z von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten	135
6.26 Darstellung des Oberflächenprofils von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten, Bahnabstand $B =$ a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm, d) 9 mm, e) 11 mm	136
6.27 Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei einem Bahnabstand von a) 3mm, b) 7mm und c) 11mm	137
6.28 a) Aufsummierung der gemessenen WSC-Fe Spritzprofile zur Ermittlung der theoretischen Schichtdicke ($B = 5\text{ mm}$), b) Gegenüberstellung der theoretischen und der experimentell ermittelten Auftragsrate als Funktion des Bahnabstandes für WSC-Fe, Darstellung der theoretischen prozentualen Auftragsrate, der experimentell ermittelten prozentualen Auftragsrate und der prozentualen Abweichung zwischen den theoretischen und den experimentellen Werten als Funktion des Bahnabstandes für c) WSC-Fe und d) WC-12Co	139

6.29 Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_Z von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten	142
6.30 Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten bei einer Verfahrgeschwindigkeit von a) 167mm/s, b) 500mm/s und c) 750mm/s	143
6.31 Einfluss der Verfahrgeschwindigkeit auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_Z von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten	145
6.32 Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei einer Verfahrgeschwindigkeit von a) 100mm/s, b) 200mm/s und c) 350mm/s	146
6.33 Ergebnisse der Kombination von Bahnplanungsparametern für das Schichtsystem WC-12Co	149
6.34 Ergebnisse der Kombination von Bahnplanungsparametern für das Schichtsystem WSC-Fe	151
6.35 Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmagespritzten (WC-12Co) Bauteilen mit Außenwinkeln. a) Repräsentative Aufnahme der Seitenfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $\gamma = 60^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ und $\gamma = 120^\circ$ an dem Übergang in die Bauteilschräge (Bereich 2) (b, d, f) und an der Bauteilspitze (Bereich 3) (c, e, g)	153
6.36 Lichtmikroskopische Aufnahmen an Querschliffen von atmosphärisch plasmagespritzten (WC-12Co) Bauteilen mit Innenradien. a) Repräsentative Aufnahme der Stirnfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $r = 20mm$ und $r = 40mm$ an dem Übergang in den Innenradius (Bereich 2) (b, d) und an einem Abschnitt des Kreisbogens (Bereich 3) (c, e)	154
6.37 Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten (WSC-Fe) Bauteilen mit Außenwinkeln. a) Repräsentative Aufnahme der Seitenfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $\gamma = 60^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ und $\gamma = 120^\circ$ an dem Übergang in die Bauteilschräge (Bereich 2) (b, d, f) und an der Bauteilspitze (Bereich 3) (c, e, g)	156

6.38	Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten (WSC-Fe) Bauteilen mit Innenradien. a) Repräsentative Aufnahme der Stirnfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $r = 20\text{mm}$ und $r = 40\text{mm}$ an dem Übergang in den Innenradius (Bereich 2) (b, d) und an einem Abschnitt des Kreisbogens (Bereich 3) (c, e)	157
6.39	Geometrische Überlagerung der Spritzprofile bei der Beschichtung von a) Innenwinkeln und b) Außenwinkeln	160
6.40	Anstellwinkel der Spritzpistole bei der Beschichtung von Bauteilen mit einem Innenradius von a) $r = 20\text{mm}$, b) $r = 40\text{mm}$	161
6.41	Einfluss der Bahnstrategie bei der Beschichtung regelgeometrischer Bauteile. Lichtmikroskopische Querschliffe der a) horizontalen Bahnstrategie, b) vertikalen Bahnstrategie, c), d) Auswertung der Bahngeschwindigkeit der Spritzpistole auf der Bauteiloberfläche	162
7.1	Optimierung eines regelgeometrischen Bauteils mit einem Außenwinkel von $\alpha = 90^\circ$ durch Variation der Verfahrensgeschwindigkeit. Darstellung der a) angepassten Bahnstrategie und b) der gemessenen Schichtdicke	170
7.2	Verringerung des Schichtdickenabfalls am Außenwinkel $\alpha = 90^\circ$ durch Beschichtung mit einer Auslaufzone. Darstellung der a) angepassten Bahnstrategie (Die hintere Bauteilflanke wird spiegelsymmetrisch beschichtet) und b) der gemessenen Schichtdicke	172
7.3	Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten Bauteilen mit Außenwinkeln ($\gamma = 90^\circ$) nach Optimierung der Spritzbahn. a) Repräsentative Aufnahme der Seitenfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf an dem Übergang in die Bauteilschräge (Bereich 2) (b, d) und an der Bauteilspitze (Bereich 3) (c, e)	174
7.4	Vickershärte- und Porositätsmessungen an beschichteten Außenwinkeln 90° . a) Schematische Darstellung der Messbereiche, b) Kleinlasthärte $HV_{0,3}$, c) Porosität	175
7.5	Optimierung eines regelgeometrischen Bauteils mit einem Innenradius $r = 40\text{mm}$ durch Variation der Verfahrensgeschwindigkeit. Darstellung der a) angepassten Bahnstrategie, b) der gemessenen Schichtdicke und c) der eingesetzten Verfahrensgeschwindigkeiten	177

7.6	Einfluss des Spritzwinkels und des Spritzabstandes auf die Schichtdicke im Übergang der Stirnfläche in den Innenradius. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahnen auf denen Spritzwinkel und Spritzabstand variiert wurden, b) gemessene Schichtdicken	180
7.7	Lichtmikroskopische Aufnahmen an Innenradien $r = 40\text{ mm}$, die mit einer angepassten Geschwindigkeit gemäß Abbildung 7.5c beschichtet wurden	181
7.8	Vickershärte- und Porositätsmessungen an beschichteten Innenradien $r = 40\text{ mm}$. a) Schematische Darstellung der Messbereiche, b) Kleinlasthärte $HV_{0,3}$, c) Porosität	182
7.9	Prinzipskizze der zu beschichtenden Umformwerkzeugmatrize	185
7.10	Beschichtung von Außenradien. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahn und des Messbereichs, b) Schichtdickendifferenz $\Delta\text{Schichtdicke}$ auf der Bauteiloberfläche, c)-f) gemessene Schichtdickenprofile über die Bauteiloberfläche	187
7.11	Herstellung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf einem Umformwerkzeugsegment durch Anpassung der Spritzbahn. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahnen, b) gemessene Schichtdicken, c) Verfahrensgeschwindigkeiten auf den Mäanderbahnen	189
7.12	Herstellung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf einem Umformwerkzeugsegment durch Anpassung der Bahnabstände. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahnen, b) gemessene Schichtdicken	191
7.13	Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten Umformwerkzeugsegmenten, die mit unterschiedlichen Bahnstrategien gespritzt wurden. a) Normale Überläufe, b) zusätzlicher Überlauf, c) angepasste Geschwindigkeit, d) angepasster Bahnabstand	192
7.14	Vickershärte- und Porositätsmessungen an beschichteten Umformwerkzeugsegmenten. a) Schematische Darstellung der Messbereiche, b) Kleinlasthärte $HV_{0,3}$, c) Porosität	193

Tabellenverzeichnis

4.1	Chemische Zusammensetzung C45-Stahl	46
4.2	Eingesetzte Edelkorund-Kornfraktionen zur Aufrauung der Probenoberfläche	46
4.3	Chemische Zusammensetzung des verwendeten WC-12Co Pulvers in m.-%	49
4.4	Chemische Zusammensetzung des WSC-Fe Fülldrahtes	51
4.5	Zur Optimierung des lichtbogengespritzten Schichtsystems WSC-Fe untersuchte Prozessparameter	60
4.6	Handhabungsparameter zur Untersuchung des Spritzabstandes, des Bahnabstandes und der Verfahrensgeschwindigkeit	63
5.1	Ermittelte Bestimmtheitsmaße als Ergebnis der Gegenüberstellung der vorhergesagten und der beobachteten Werte für plasmagespritztes WC-12Co	77
5.2	Vorhergesagte und beobachtete Werte als Ergebnis des Central Composite Designs	78
5.3	Optimierte Spritzparameter als Ergebnis des Central Composite Designs	78
5.4	Optimierte Prozessparameter für das Lichtbogenspritzen von WSC-Fe .	94
6.1	Statistische Streuung der Schichtdicke im atmosphärischen Plasmaspritzprozess mit WC-12Co und im Lichtbogenspritzprozess mit WSC-Fe	150
8.1	Central Composite Design mit 24 Läufen und 6 Centerpoints (c) zur Abschätzung des Fehler. Eingesetzt zur Optimierung des atmosphärisch plasmagespritzten Schichtsystems WC-12Co	233

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Bedeutung
3D	dreidimensional
Al	Aluminium
Al_2O_3	Aluminiumoxid
APS	Atmosphärisches Plasmaspritzen
Ar	Argon
C	Kohlenstoff
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
Co	Kobalt
Co_3W_3C	ternäre η -Phase
Co_6W_6C	sexternäre η -Phase
Cr	Chrom
$Cu K\alpha$	$K\alpha$ -Strahlung des Elements Kupfer
CVD	Chemical Vapor Deposition
\varnothing	Durchmesser
DC	Direct Current
DIN	Deutsche Industrienorm
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
EKF	Edelkorund Kornfraktion
EN	Europäische Norm
Fe	Eisen
FeO	Eisenoxid
H_2	Wasserstoff
He	Helium
HV	Härte Vickers
ISO	Internationale Organisation für Normung

Mn	Mangan
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
PG	Primärgasdruck
PVD	Physical Vapor Deposition
RAPID	Programmiersprache für ABB-Roboter
RF	Radio Frequency
S	Schwefel
SG	Sekundärgasdruck
Si	Silizium
TCP	Tool Center Point
TiO ₂	Titandioxid
vgl.	vergleiche
W	Wolfram
WC	Wolframkarbid
WC _{1-x}	nicht stöchiometrisches Wolframkarbid
W ₂ C	Wolframdikarbid
WSC	Wolframschmelzkarbid
WC-12Co	Wolframkarbidkobalt in der Zusammensetzung 88 m.-% Wolframkarbid und 12 m.-% Kobalt

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
α	°	Spritzwinkel
a_i	-	Achspunkte im Central Composite Design
A	mm ²	Eindruckoberfläche des Vickerseindrucks
$A_{WC-12Co}$	µm/Überlauf	Auftragsrate des Schichtsystems WC-12Co
$A_{geschmolzene\ Karbide}$	mm ²	Flächeninhalt der Bereiche mit stark umgeschmolzenen Karbiden
A_{gesamt}	mm ²	Flächeninhalt der gesamten lichtmikroskopischen Aufnahme
A_{WSC-Fe}	µm/Überlauf	Auftragsrate des Schichtsystems WSC-Fe
β_k	-	Regressionskoeffizienten
B	mm	Bahnabstand
b_i	-	Achspunkte im Central Composite Design

d	mm	Mittelwert aus den zwei gemessenen Diagonalen d_1 und d_2 in einem Vickers-eindruck
D	μm	Schichtdicke
Δ Schichtdicke	μm	Differenz zwischen der minimalen und der maximalen Schichtdicke
$DE_{WC-12Co}$	%	Auftragswirkungsgrad des Schichtsystems WC-12Co
DE_{WSC-Fe}	%	Auftragswirkungsgrad des Schichtsystems WSC-Fe
$DE_{N,WC-12Co}$	%	Normierter Auftragswirkungsgrad des Schichtsystems WC-12Co
$DE_{N,WSC-Fe}$	%	Normierter Auftragswirkungsgrad des Schichtsystems WSC-Fe
ε	nm	Wellenlänge der CuK_α -Strahlung
E	GPa	Elastizitätsmodul
F	N	Prüfkraft
FWHM	-	Halbwertsbreite
γ	$^\circ$	Außenwinkel
k	-	Kurtosis
l	cm	Länge
L	-	linearer Effekt in einem Pareto Diagramm
l_0	-	Mittelwert der Gaußverteilung
l_c	mm	Grenzwellenlänge
μ	-	Poissonzahl
n	-	Anzahl der Prozessparameter im Central Composite Design
p	-	Ergebnis des p-Tests
Q	-	quadratischer Effekt in einem Pareto Diagramm
r	mm	Radius
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
R_p	μm	größte Profilspitze
R_v	μm	größtes Profiltal
R_z	μm	gemittelte Rautiefe
σ	-	Standardabweichung

s	-	Schiefe
S	mm	Spritzabstand
$T_{WC-12Co}$	°C	Temperatur der WC-12Co Spritzpartikel
T_{WSC-Fe}	°C	Temperatur der WSC-Fe Spritzpartikel
V	mm/s	Verfahrgeschwindigkeit
$V_{brenner}$	mm/s	Verfahrgeschwindigkeit des Spritzbrenners
V_N	m/s	Normalkomponente der Partikelgeschwindigkeit
V_p	m/s	Partikelgeschwindigkeit
$V_{substrat}$	mm/s	Verfahrgeschwindigkeit des Substrats
V_T	m/s	Tangentialkomponente der Partikelgeschwindigkeit
w	-	beschichteter Bereich auf der Substrat- oberfläche
x_i	-	Prozessparameter im Regressionsmodell
z_0	-	additive Konstante
z_{max}	-	Amplitudennormierungsfaktor

Kapitel 1

Einleitung

Die stetig steigenden Anforderungen an die Eigenschaften von Bauteilen und die zunehmende Verknappung der Rohstoffe in allen Industriezweigen räumen der Oberflächentechnik einen immer größeren Stellenwert zur Erzeugung hochqualitativer, langlebiger und gleichzeitig kostengünstiger Bauteile ein. Durch die Verfahren der Oberflächentechnik können Bauteiloberflächen funktionalisiert werden, so dass sie allen Ansprüchen genügen, die aus dem Gebrauch, dem Einsatz und der Verwendung entstehen [Mue03]. Ein wichtiges Teilgebiet der Oberflächentechnik ist die Beschichtungstechnik. Bei dem Einsatz von Beschichtungstechnik werden in der Regel minderwertige Grundwerkstoffe mit einer Beschichtung überzogen, die in ihren Funktionseigenschaften an das Anwendungsgebiet angepasst ist. Zum Einsatz kommen dabei verschiedenste Beschichtungsverfahren, mit denen Schichten mit Dicken zwischen einigen Nanometern (PVD, CVD) bis hin zu einigen Millimetern (Auftragsschweißen, Plattieren) hergestellt werden können.

Eines der heutzutage technisch und wirtschaftlich wichtigsten Beschichtungsverfahren ist die Thermische Spritztechnik [LB02]. Mit der Thermischen Spritztechnik werden Schichten mit Dicken zwischen 50 μm und 1 mm hergestellt, die hauptsächlich für den Verschleiß- und Korrosionsschutz eingesetzt werden. Weitere Einsatzgebiete der Thermischen Spritzschichten sind die Wärmedämmung, die elektrische Isolation sowie dekorative Anwendungen, so dass mit der Thermischen Spritztechnik eine große Bandbreite an Oberflächenveredelungen durchgeführt werden können. Dementsprechend weit gefächert sind die Industriezweige, in denen die Thermische Spritztechnik eingesetzt wird. Einige wichtige zu nennende Branchen sind die Luft- und Raumfahrtindustrie, das Papier- und Druckgewerbe, die Pumpenindustrie und der Kraftwerksbau.

Die Hauptvorteile der Thermischen Spritztechnik gegenüber anderen Beschichtungsverfahren liegen in der Einsetzbarkeit beliebiger Werkstoffe als Spritzzusatz oder als Substratwerkstoff, in der Möglichkeit beliebige Bauteilabmessungen und -formen zu beschichten und in der exzellenten Automatisierbarkeit der Thermischen Spritztechnik. Diese Eigenschaften machen die Thermische Spritztechnik zu einem häufig genutzten Verfahren zur Veredelung von Oberflächen und verleihen ihr dadurch eine hohe Relevanz in dem Bereich der Oberflächentechnik. Weltweit erreicht die Thermische Spritztechnik ein Umsatz von gut 6 Milliarden Euro, wobei im europäischen Raum knapp 30 % dieser Summe erwirtschaftet werden. Für den Standort Deutschland liegt das Volumen bei geschätzten 360 Millionen Euro [DL08]. Zudem wird dem Markt des Thermischen Spritzens ein Wachstum bis weit in die Zukunft propagiert [BW07].

Die Technik des Thermischen Spritzens basiert auf der Aufschmelzung und Verdünnung eines Spritzzusatzes zu einem Strahl aus geschmolzenen oder teilgeschmolzenen Spritzpartikeln, die beim Aufprall auf eine Bauteiloberfläche eine Spritzschicht bilden. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Schichtdicke wird beim Thermischen Spritzen die Spritzpistole, ähnlich wie beim Lackieren oder beim Auftragsschweißen, mit einer konstanten Verfahrgeschwindigkeit in einer mäanderförmigen Bahn über die Bauteiloberfläche verfahren. Bei Bauteilen mit einer geringen Geometriekomplexität kann dies händisch oder durch den Einsatz einer Linearverfahreinheit durchgeführt werden, wobei die Beschichtung komplexer Bauteile ungleich komplizierter ist, da hier ein Industrieroboter sowie eine an die Bauteiloberfläche angepasste Bahnplanung eingesetzt werden müssen.

Der Großteil der Thermischen Spritzschichten wird heutzutage auf großflächige ebene oder rotationssymmetrische Bauteile aufgetragen, wie beispielsweise verschiedenste Walzen und Zylinder für die Papierindustrie [VN07], Hydraulikzylinder und Lagerhülsen für den Maschinenbau, Pumpenteile und Plunger für die Pumpenindustrie sowie Rohrleitungen für die Chemie- und Petrolindustrie [WB92]. Die Maßgenauigkeit und die Oberflächenqualität der Spritzschicht wird dabei im Anschluß an die Beschichtung durch einen Nachbearbeitungsprozess eingestellt.

Der Trend bei der Thermischen Spritztechnik geht allerdings immer stärker dazu über, auch komplexe Bauteile zu beschichten. Einige Beispiele hierfür sind Turbinenschaukeln für die Energietechnik, Innenzylindern und Kurbelwellen für die Automobilindustrie [KNR98], Kessel, Giessmaschinenteile und Kokillen für die Metallindustrie [NOV10], Prothesen für die Medizintechnik sowie verschiedene Werkzeuge für den allgemeinen Maschinenbau. Um auf derartigen Bauteilen eine gleichmäßige Schichtdicke und -qualität zu erzielen, werden heutzutage in den meisten Fällen sukzessive Opti-

mierungsschleifen auf Grundlage eines Trial-and-Error-Prozesses durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist äußerst zeit- und kostenintensiv und die hierbei erlangten Erkenntnisse können nicht ohne weiteres auf andere Bauteilgeometrien übertragen werden. Hinzu kommt, dass die Anforderung an die wie-gespritzte Schicht ungleich höher ist, da auf komplexen Oberflächen Nachbearbeitungsverfahren häufig nicht wirtschaftlich durchgeführt werden können.

Daraus ergibt sich die Forderung, dass systematische Untersuchungen der Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Bauteile durchgeführt werden, durch die der Optimierungsaufwand zur Herstellung einer gleichmäßigen Beschichtung auf einer beliebig geformten Geometrie deutlich reduziert werden kann. In der Fachliteratur lassen sich allerdings nur recht wenige Veröffentlichungen finden, in denen die Einflussgrößen der Bauteilbeschichtung zusammenhängend betrachtet werden. Häufig wird nur eine Einflussgröße separiert untersucht, ohne ihre Wechselwirkung mit anderen Einflussgrößen zu betrachten oder Strategien aufzuzeigen, wie diese Einflussgröße gezielt zur Generierung einer gleichmäßigen Schichtdicke und -qualität genutzt werden kann.

Diese Problematik greift die vorliegende Dissertation auf. In dieser Arbeit wird ein ganzheitliches Konzept zur Herstellung von hochqualitativen und maßgenauen Verschleißschutzschichten auf beliebig geformten Bauteiloberflächen präsentiert. Dies wird anhand der Thermischen Spritzverfahren Atmosphärisches Plasmaspritzen und Lichtbogenspritzen durchgeführt. Zunächst werden Prozessparameterstudien vorgestellt, mit denen Spritzparameter zur Herstellung von Schichten mit einer dichten und homogenen Morphologie, einer glatten Topographie, einer guten adhäsiven und kohäsiven Schichthaftung, sowie einer geringen thermischen Zersetzung der Karbide ermittelt werden. Danach werden die Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Bauteile untersucht und ein empirisches Modell zur Vorhersage von Schichtdicken aufgestellt. Dabei werden grundsätzliche Unterschiede zwischen der Beschichtung mit dem Atmosphärischen Plasmaspritzen und dem Lichtbogenspritzen herausgearbeitet. Anschließend werden mehrere Fallstudien für den Lichtbogenspritzprozess vorgestellt, mit denen auf verschiedenen Bauteilgeometrien durch eine Anpassung der Handhabungsparameter der Spritzpistole (z.B. Verfahrensgeschwindigkeit, Bahnabstand) gleichmäßige und endkonturnahe Beschichtungen erzielt werden konnten.

Kapitel 2

Stand der Technik

2.1 Thermisches Spritzen

Das Thermische Spritzen wurde um 1910 von Dr. Max Ulrich Schoop erfunden [Sch01]. Er meldete in dem Zeitrahmen von 1910 bis 1913 verschiedene weltweite Patente für seine neue revolutionäre Technik an. Bei dem ursprünglichen Prozess wurde geschmolzenes Metall verwendet, welches durch Schläuche zu einer Ringdüse floß, an der es mit einem sehr hohen Gasdruck zerstäubt wurde. Anfangs war das Thermische Spritzen auf Materialien mit einem niedrigen Schmelzpunkt wie Zinn oder Blei beschränkt. Die dabei entstehenden Schichten wiesen eine sehr grobe Mikrostruktur auf. Trotzdem waren sie für viele Anwendungen nützlich [Shr95].

Einige Jahre später wurde das Flammsspritzen entwickelt, bei dem erstmals der Spritzzusatz in Form eines Drahtes in die Spritzpistole gefördert wurde. Dieser Prozess war allerdings auf Schmelztemperaturen von 1500 - 1600°C begrenzt, so dass hochschmelzende Materialien nicht verspritzt werden konnten. Ein bedeutender Fortschritt im Thermischen Spritzen trat durch die Entwicklung des Plasmaspritzens ein. Mit der Einführung des Plasmabrenners im Jahre 1939 konnten erstmals alle schmelzbaren Werkstoffe im Spritzprozess verarbeitet werden [SN91]. In den nachfolgenden Jahren wurden einige Modifikation des Plasmaspritzprozesses durchgeführt. Durch den Einsatz von Vakuum- [MH92] oder Inertgasatmosphären [Fes95] beispielsweise konnte die Dichtheit der Spritzschichten erhöht und Oxidation weitgehend minimiert werden. Hierdurch wurde der Spritzprozess jedoch wesentlich teurer. Einen wichtigen Meilenstein im Thermischen Spritzen stellte die Entwicklung des Lichtbogenspritzens um 1950 dar [FVD01]. Mit dem Lichtbogenspritzprozess hatte man erstmal einen extrem wirtschaftlichen Spritzprozess, der zunächst allerdings auf leitende Materialien be-

schränkt war. Parallel zu der Entwicklung des Plasmaspritzprozesses wurde das Detonationsspritzen auf den Markt gebracht [MK65]. Das Detonationsspritzen ermöglichte die Herstellung äußerst dichter Schichten mit einer hohen Härte, einem hohen Verschleißwiderstand und einer exzellenten Schichthaftung. Aufgrund der sehr langen Beschleunigungsdüse wurde dieser Prozess allerdings nur zur Instandsetzung von verschlissenen Bauteilen genutzt. In den 1980ern wurde das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen eingeführt, mit dem ebenfalls hervorragende Schichtqualitäten erzeugt werden konnten [TR92]. Im Vergleich zum Detonationsspritzen wies das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen verschiedene Vorteile wie einen kontinuierlichen Verbrennungsprozess, eine kürzere Beschleunigungsdüse, uvm. auf, so dass es den Detonationsspritzprozess weitgehend ablöste. Mitte der 1980er wurde das Kaltgasspritzen entwickelt, mit dem dichte Schichten bei minimaler Oxidation und thermischer Zersetzung des Spritzzusatzes hergestellt werden konnten [SGK06]. Im Kaltgasspritzprozess lassen sich jedoch weitgehend nur weiche Werkstoffe wie Polymere und Metalle verarbeiten.

Heutzutage ist das Thermische Spritzen eines der am häufigsten genutzten Verfahren in der modernen Oberflächentechnik. Nach einer empirischen Erhebung aus dem Jahre 2000 nimmt die Thermische Spritztechnik den vierten Platz hinter Galvano-, Lackiertechnik und Diffusionsverfahren zur Wärmebehandlung ein. Erst nachfolgend werden Dünnschichtverfahren (PVD, CVD) und das Auftragsschweißen gelistet [BW05]. Die Thermische Spritztechnik hat seit 1990 einen stetig steigenden Anteil am Markt der Oberflächentechnik, dessen Anstieg im Gegensatz zu den Konkurrenzverfahren auch noch in die fernere Zukunft propagiert wird. Eine Studie des DVS aus dem Jahre 2007 beispielsweise prognostiziert ein weiteres Wachstum für den Sektor des Thermischen Spritzens von 10% pro Jahr [BW07], welches auf die geringe Umweltbelastung beim Thermischen Spritzen und einem hohen Potenzial, konventionelle Beschichtungstechnologien wie z.B. die Hartverchromung zu ersetzen, zurückzuführen ist.

Das moderne Thermische Spritzverfahren ist definiert durch die Deutsche Industrienorm (DIN). Nach DIN 8580 gehört es zu dem Fertigungsverfahren „Beschichten mit einem Überzugswerkstoff aus einem körnigen oder pulverförmigen Zustand“. Nach DIN EN 657 ist es ein „Verfahren, bei dem Spritzzusätze innerhalb oder außerhalb der Spritzpistole zugeführt und bis zum plastischen oder geschmolzenen Zustand aufgeheizt und dann auf die vorbereitete Oberfläche geschleudert werden; die Oberfläche wird dabei nicht aufgeschmolzen [KA08]“.

Mit den in der Norm beschriebenen Eigenschaften ist die Thermische Spritztechnik in erster Linie ein Verfahren zur Herstellung von Oberflächenschutzschichten. Beim

Thermischen Spritzen werden Hochleistungsbeschichtungen auf kostengünstige und einfach bearbeitbare Grundwerkstoffe aufgebracht und so werden dem Werkstoffverbund maßgeschneiderte Eigenschaften gegeben [FVD01]. Hierzu gehören beispielsweise Beschichtungen für den Korrosions-, Verschleiß- und Oxidationsschutz sowie elektrisch und thermisch leitende Eigenschaften. Weiterhin werden thermische Spritzschichten für die Wärmedämmung, als Schutz gegen Erosion, zur Verbesserung von Gleiteigenschaften, in der Medizintechnik, zur Dekoration, für Sonderanwendungen oder als Zwischenschicht erzeugt [BW05, SE08]. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Reparatur von verschlissenen oder schlecht gefertigten Bauteilen auf ihre Ausgangsqualität und -dimension.

Im Spritzprozess werden heutzutage zahlreiche unterschiedliche Spritzzusätze eingesetzt. Die Hauptanforderung an die Spritzzusatzwerkstoffe ist, dass diese durch die Spritzflamme aufgeschmolzen werden können und dabei kein übermäßiger Abbrand von Legierungselementen oder eine andere relevante Änderung der chemischen Zusammensetzung auftritt. In Kombination mit den vielen verfügbaren Thermischen Spritzprozessen kann daher eine große Bandbreite an Spritzzusätzen, u.a. Metalle, Nichtmetalle, Keramiken, Polymere und Verbundwerkstoffe [LB02], in der Thermischen Spritztechnik appliziert werden. In Abhängigkeit des verwendeten Spritzverfahrens kommen sie in Form von Pulvern, Massivdrähten, Fülldrähten, Stäben oder Schnüren zum Einsatz [WD06].

2.2 Verfahren des Thermischen Spritzens

Seit der Einführung des Thermischen Spritzens wurden viele unterschiedliche Thermische Spritzverfahren entwickelt, die in ihrer Funktionsweise auf bestimmte Werkstoffgruppen oder zur Erzeugung bestimmter Schichteigenschaften angepasst sind. Nach der DIN EN 657 werden sie nach der Art des verwendeten Energieträgers unterteilt (Abbildung 2.1).

Bei allen Thermischen Spritzverfahren beruht die Funktionsweise auf dem Einsatz von zwei Energiearten zur Erzeugung von Spritzschichten, der thermischen und der kinetischen Energie. Beide Energiearten in Kombination bewirken, dass zwischen einzelnen Spritzteilchen sowie zwischen Spritzteilchen und der Substratoberfläche beim Teilchenaufprall eine Verbindung entsteht. Die thermische Energie übernimmt im Spritzprozess die Funktion den Spritzzusatz an- oder aufzuschmelzen. Die kinetische Energie hingegen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Dichte der Schicht und die

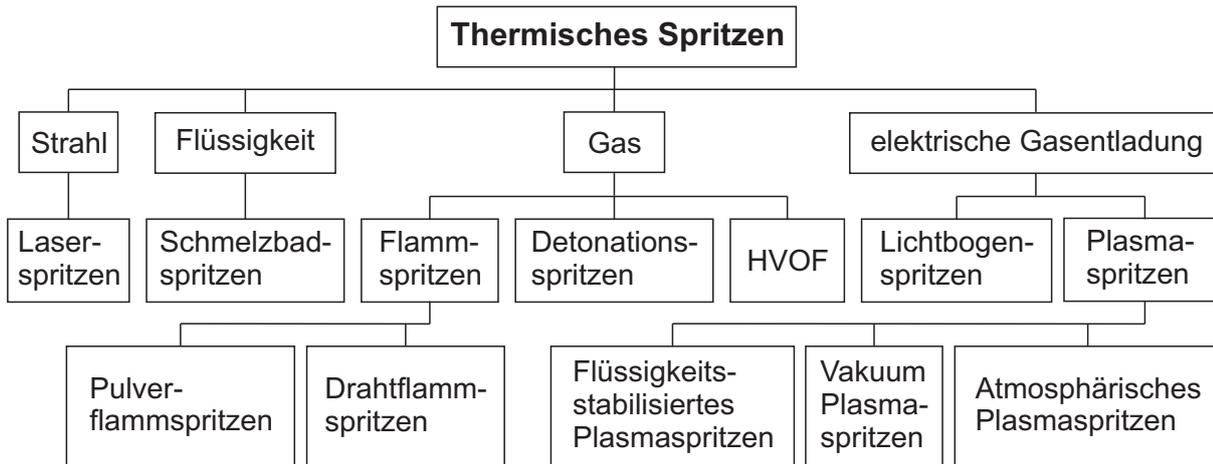


Abbildung 2.1: Thermische Spritzprozesse nach DIN EN 657

Verklammerung des Schichtverbundes in sich (kohäsiv) sowie die Haftfestigkeit zum Grundwerkstoff (adhäsiv) [FSWT06]. Beide Energiearten lassen sich durch viele verschiedene Faktoren im Spritzprozess beeinflussen. Den größten Einfluss auf beide Energien hat die Wahl des Spritzverfahrens und somit die Art des Energieträgers. Die heutzutage am häufigsten eingesetzten Energieträger sind verschiedene, meist brennbare, technische Gase und Flüssigkeiten sowie die elektrische Energie. Durch die Wahl des Spritzverfahrens kann sowohl die thermische Energie als auch die kinetische Energie der aufprallenden Spritzpartikel nahezu lückenlos über mehrere Potenzen eingestellt werden [Lon04b]. In geringerem Umfang können darüberhinaus beide Energiearten durch die Größe und Fraktion des Spritzzusatzes sowie durch die Wahl der Prozessparameter beeinflusst werden [Cra04b, SE08].

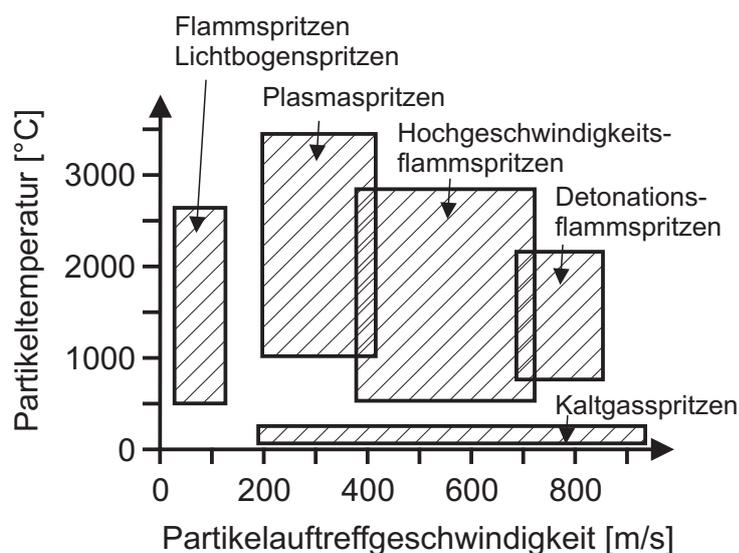


Abbildung 2.2: Vergleich der gebräuchlichsten Spritzverfahren in Abhängigkeit der Partikeltemperatur und der Partikelgeschwindigkeit im Spritzprozess

Die verschiedenen Thermischen Spritzverfahren arbeiten in unterschiedlichen Energieniveaus. Ein schematischer Überblick der Partikeltemperatur als Funktion der Partikelauftreffgeschwindigkeit für die gebräuchlichsten Thermischen Spritzverfahren ist in Abbildung 2.2 aufgeführt. Das Schema verdeutlicht, dass die unterschiedlichen Spritzverfahren verschiedene Charakteristika aufweisen und daher nicht miteinander im Wettbewerb stehen, sondern sich vielmehr über das gesamte Anwendungsspektrum ergänzen. So kann je nach eingesetztem Verfahren und durch die Wahl der Spritzprozessparameter die daraus resultierende Schichtstruktur beeinflusst werden und folglich können Spritzschichten mit den unterschiedlichsten chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften erzeugt werden.

Besonders das Atmosphärische Plasmaspritzen und das Lichtbogenspritzen sind seit vielen Jahren etablierte Verfahren der Thermischen Spritztechnik. Trotz der Entwicklung von hochkinetischen Spritzprozessen wie dem Hochgeschwindigkeitsflammspritzen und dem Kaltgasspritzen, mit denen Spritzschichten mit einer sehr hohen Qualität erzeugt werden können, werden das atmosphärische Plasmaspritzen und das Lichtbogenspritzen nach wie vor für einen Großteil der Anwendungen eingesetzt. Dies lässt sich auf die Eigenschaften dieser Prozesse zurückführen, auf die in den folgenden Kapiteln eingegangen wird.

2.2.1 Atmosphärisches Plasmaspritzen

Im Jahr 1939 wurde der erste DC Plasmabrenner entwickelt, mit dem zunächst nur Spritzschichten mit schlechten mikrostrukturellen Eigenschaften, wie z.B. einer hohen Porosität, erzeugt werden konnten [SN91]. Schon im frühen Entwicklungsstadium erkannte man das hohe Potenzial des Plasmaspritzprozesses. Im Vergleich zu dem damals hauptsächlich genutzten Flammspritzen, konnten mit dem Plasmaspritzprozess wesentlich höhere Flammtemperaturen erzeugt werden und darüber hinaus war es möglich die Charakteristiken des Plasmas gezielter zu steuern. Somit war es erstmals möglich beliebige schmelzbare Werkstoffe zu verspritzen. In den 1950ern wurden erhebliche Erweiterungen des DC Plasmabrenners von verschiedenen Firmen durchgeführt. Ab den 1960er Jahren wurde das Plasmaspritzen das Standardbeschichtungsverfahren in der Luft- und Raumfahrtindustrie. In den frühen 1970ern wurden die ersten Hochgeschwindigkeits-Lichtbogenbrenner entwickelt, mit denen die kinetische Energie der Spritzpartikel deutlich gesteigert werden konnte [LSH89]. In den späten 1980ern wurden sie grundlegend verbessert [Mor91]. Ab 1985 wurden RF Plasmabrenner [Bou92] eingeführt und kurz danach zur Marktreife gebracht. Heute gibt es zahl-

reiche Varianten des Plasmaspritzprozesses, die sich durch die Art der Plasmagase (Ar, He, H_2 , N_2), die Anzahl der Kathoden und die erreichbaren Partikelgeschwindigkeiten und -temperaturen unterscheiden. Das am häufigsten genutzte Verfahren ist jedoch nach wie vor das Atmosphärische DC Plasmaspritzen.

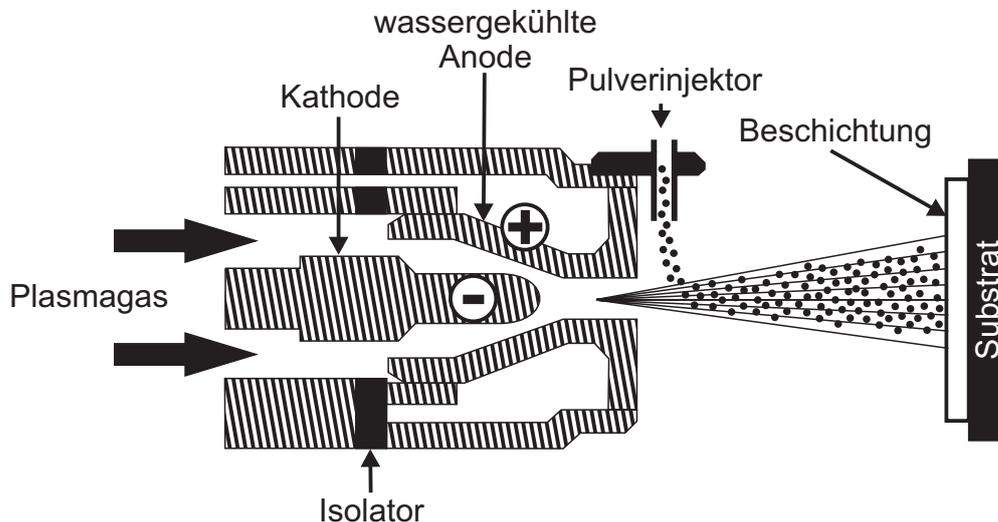


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Atmosphärischen Plasmaspritzprozesses

Das Prinzip des atmosphärischen DC Plasmaspritzens, kurz APS (Atmospheric Plasma Spraying), ist in Abbildung 2.3 dargestellt. In einem APS-Prozess wird ein Lichtbogen zwischen einer thoriumdotierten (1 - 2% ThO_2) Wolframkathode und einer als Ringdüse konzipierten Kupferanode gezündet [VVFS94]. Beide Elektroden sind zum Schutz vor Überhitzung wassergekühlt. Je nach Hersteller werden unterschiedliche Designs der Elektroden eingesetzt, die sich in dem Öffnungswinkel der Kathode, der Gasinjektion (axial, verwirbelt), dem Düsendurchmesser und der Form unterscheiden [FV94]. Das Prozessgas, im Allgemeinen ein Gemisch aus Argon, Wasserstoff, Stickstoff und Helium, wird über einen Gasverteilungsring eingeblasen, so dass es zwischen Anode und Kathode hindurchströmt. Die zwischen Anode und Kathode anliegende Spannung beschleunigt die an der Kathode freiwerdenden Elektronen. Diese stoßen auf Atome des Arbeitgases und dissoziieren bzw. ionisieren es. Molekülgase dissoziieren bei dem Aufprall eines Elektron zunächst in Einzelatome. Die Einzelatome verlieren bei einem erneuten Auftreffen von Elektronen ihre äußeren Randelektronen und bilden freie Ionen und Elektronen [GPS10]. Es entsteht ein Plasmastrahl mit Temperaturen zwischen 10000 - 14000 K und einer geringen Plasmadichte [FVD01]. Die Art und Menge des Sekundärgases (He, H_2 , N_2) beeinflusst die Enthalpie, die Viskosität sowie die Wärmeleitfähigkeit des Plasmagases und wird entsprechend dem Spritzzusatz angepasst. Der pulverförmige Spritzwerkstoff wird in den meisten Fällen durch einen

externen Injektor radial in die Plasmaflamme eingedüst und das injizierte Pulver wird durch die hohe Expansionsgeschwindigkeit des Trägergases auf Partikelgeschwindigkeiten bis zu 300 m/s beschleunigt. Gleichzeitig bewirkt die enorm hohe Temperatur des Plasmagases ein teilweises bzw. vollständiges Aufschmelzen des Pulvers. Die Injektion des Pulvers geschieht in der Regel an der heißesten Stelle des Plasmas, wodurch ein sehr hoher Aufschmelzgrad gewährleistet wird. Bei besonders temperatursensitiven Spritzzusätzen kann durch eine Erhöhung des axialen und radialen Abstandes der Pulverinjektion die Partikeltemperatur und der Aufschmelzgrad angepasst werden. Dabei korreliert die Aufenthaltsdauer der Partikel im Freistrahle mit ihrer Energieaufnahme. Die axiale Geschwindigkeit der Spritzteilchen wird durch viele Größen wie die Gaszusammensetzung, die Partikelgröße, den Gasdurchsatz und die zugeführte elektrische Leistung bestimmt [Ste92].

Die hohe Partikelgeschwindigkeit hat zur Folge, dass die Flugphase eines Pulverteilchens nur wenige Millisekunden dauert [LSH89]. Trotzdem treten Reaktionen der Spritzteilchen mit der umgebenden Atmosphäre auf. Verursacht wird dies durch die hohe Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Plasmafreistrahle und der umgebenden Atmosphäre. Es entstehen Turbulenzen [PFS91], die dazu führen, dass die umgebende Atmosphäre in Form von kalten Blasen in den Plasmafreistrahle eindringt [PFS91]. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Gasdurchsatz und mit abnehmender Viskosität der Gase [RVVF89, PEDF92]. Als Resultat kühlt der Plasmafreistrahle rasch ab und bei der Anwesenheit von Sauerstoff in der Atmosphäre tritt eine Oxidation der Spritzzusätze auf.

Ein bekannter Nachteil des DC Plasmaspritzens ist die Tatsache, dass der Lichtbogen zwischen Anode und Kathode im Spritzprozess kontinuierlich fluktuiert. Die Fluktuation tritt mit Frequenzen zwischen 2 - 6 kHz auf und ist stark abhängig von der verwendeten Gaszusammensetzung [FSH94, PDL⁺97]. Dieses hat sowohl einen Einfluss auf die Beschichtungsqualität, als auch auf die Lebenszeit der Anode [Pfe94]. Es wurden in der Vergangenheit viele verschiedene Ansätze durchgeführt um eine Fluktuation des Lichtbogens zu verhindern. Dazu gehören segmentierte Anoden und Anoden die stückweise ihren Durchmesser ändern. Aufgrund der zusätzlichen Komplexität im Spritzprozess bei der Verwendung von segmentierten Anoden werden sie aber nur sehr selten kommerziell eingesetzt.

2.2.2 Lichtbogenspritzen

Seit seiner Einführung um 1950 ist das Lichtbogenspritzen eines der industriell am häufigsten genutzten Spritzverfahren, da es gegenüber anderer Verfahren der Thermischen Spritztechnik einige erhebliche Vorteile aufweist. Mit dem Lichtbogenspritzen können sehr hohe Auftragsraten (6 - 80 Kg/h [BCT⁺01]) realisiert werden, wodurch Spritzschichten mit Schichtdicken bis zu mehreren Millimetern wirtschaftlich hergestellt werden können [PLLC03, PMAC05]. Zudem sind die Anlagenkosten beim Lichtbogenspritzen gegenüber den meisten anderen Verfahren, sowohl in der Anschaffung, als auch im Betrieb relativ gering [WJR⁺08]. Aufgrund der einfachen Handhabbarkeit kann der Spritzprozess mit einem sehr geringen Aufwand automatisiert werden. Besonders interessant für die industrielle Anwendung des Lichtbogenspritzens ist die Tatsache, dass beim Lichtbogenspritzen keine brennbaren Prozessgase erforderlich sind. Dadurch ist das Lichtbogenspritzen nicht nur ein äußerst sicherer Prozess sondern auch ein sehr wirtschaftliches Verfahren, dass hinsichtlich der Energieausnutzung zum Aufschmelzen des Spritzzusatzes mit keinem anderen Verfahren des Thermischen Spritzens vergleichbar ist.

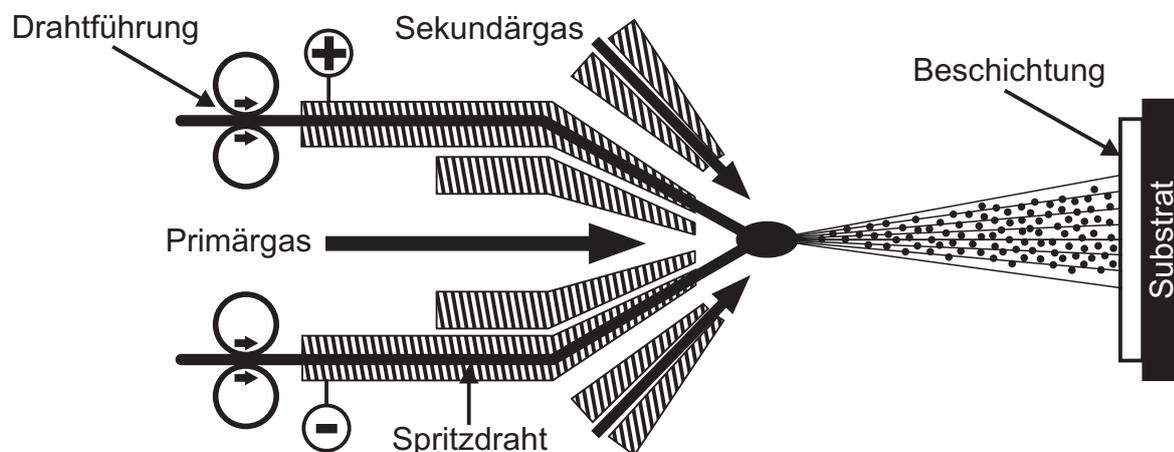


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines Lichtbogenspritzprozesses

Bei dem Lichtbogenspritzen werden zwei metallische Drähte mit geregelter Drahtvorschubgeschwindigkeit in die Spritzpistole durch Schieben und Ziehen des Drahtes (push and pull) gefördert (Abbildung 2.4). Zwischen den Drähten wird durch Anlegung einer Spannung ein Lichtbogen gezündet und die Drähte werden an-, ab- oder aufgeschmolzen und mittels eines Zerstäubergases auf die vorbereitete Werkstückoberfläche geschleudert [KH02]. Die thermische Energie des Lichtbogens wird in Form von Elektrizität bereitgestellt, deren Übertrag meist über kupferne, kontaktgebende Drahtführungen in einem Winkel von 30° bis 60° erfolgt. Von allen Teilwiderstän-

den im Stromkreis weist die Berührungsstelle der Drähte den geringsten Ohm'schen Widerstand auf. Ab einem kritischen Mindestabstand der Drahtenden wird die Umgebungsluft ionisiert und ein Lichtbogen gezündet. Dabei fällt die Spannung in der Stromquelle kurzfristig ab und es tritt ein hoher Kurzschlussstrom auf, der eine Temperaturerhöhung auf bis zu 6500°C und ein Aufschmelzen der Drahtenden zur Folge hat [SE08]. Die Zerstäubung der Drahtschmelze erfolgt durch Druckluft, die aus einer axialen Düse (Primärgas) austritt und die Spritzteilchen auf Geschwindigkeiten zwischen 50 - 150 m/s beschleunigt. Bei einigen Düsensystemen wird zusätzlich ein radial wirkender Gasstrom genutzt (Sekundärgas), mit dem der Partikelbildungsprozess positiv beeinflusst werden kann, indem durch eine Fokussierung und Stabilisierung des Spritzstrahls feinere Spritzpartikel gebildet werden [PMAC05].

Der Lichtbogen im Lichtbogenspritzprozess brennt nicht kontinuierlich, sondern fluktuiert mit einer hohen Frequenz. Beim Annähern der Drähte findet bei der Unterschreitung eines kritischen Abstandes eine Gasentladung statt und die Drahtenden werden aufgeschmolzen und durch die Druckluft zerstäubt. Dabei bricht der Lichtbogen zusammen und muss erneut gezündet werden. Die Anzahl der Gasentladungen pro Zeiteinheit (Stromstärke) wird beim Lichtbogenspritzen durch den Drahtvorschub geregelt. Mit zunehmender Drahtvorschubgeschwindigkeit steigt die Lichtbogenfrequenz und damit die Anzahl der Gasentladungen [BML06]. Die Kontinuität des Lichtbogens unterliegt im Spritzprozess weiteren Störungen. Durch eine Variation des Zerstäubergasdruckes [WWPH98] und durch unterschiedliche elastische Vorgänge an den Drahtenden bei verschiedenen Spritzzusätzen fluktuiert der Lichtbogen mit unterschiedlichen Frequenzen bzw. bei einer falschen Parameter- oder Werkstoffauswahl kommt der Prozess vollständig zum Erliegen. Zur Erzeugung eines stabilen Lichtbogens werden in der Regel kurze Abstände zwischen Anode und Kathode bevorzugt. Kürzere Lichtbögen sind weniger störungsempfindlich und können daher mit höheren Drahtvorschüben betrieben werden. Charakteristisch für das Lichtbogenspritzen ist zudem das unterschiedliche Abschmelzverhalten der Drähte an Anode und Kathode [HH01, HH03, LZB⁺05].

Die Qualität der lichtbogengespritzten Schichten hängt von verschiedenen Faktoren im Spritzprozess ab. Dazu gehören die Teilchenbildung im Lichtbogen, das kinetische Verhalten und Reaktionen der Spritzteilchen während der Flugphase und die Beschaffenheit der Substratoberfläche [GBL⁺03]. Das Zerstäubergasmedium und die Zerstäubergasmenge sind gemäß der Fachliteratur die wichtigsten Einflussgrößen im Lichtbogenspritzprozess auf die Größe der Spritzteilchen und die sich einstellende Schichtqualität [WBJ04, TVN09]. Weitere bedeutsame Einflussfaktoren sind die Art des Dü-

sensystems, die elektrische Leistung und der Spritzabstand.

Neben den vielen Vorteilen weist das Lichtbogenspritzen auch einige Nachteile auf. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Partikelgeschwindigkeiten der Spritzpartikel haben lichtbogengespritzte Schichten in der Regel ein inhomogenes, stark lamellares Gefüge mit einer hohen Oberflächenrauheit. Auch tritt beim Lichtbogenspritzen ein beträchtlicher Spritzverlust, durch abprallende Spritzpartikel auf. Ein weiterer Nachteil ist das begrenzte Spektrum an Werkstoffen, die im Lichtbogenspritzprozess eingesetzt werden können. Die Spritzzusätze müssen elektrisch leitend sein und eine gewisse Duktilität aufweisen. Daher können besonders Keramiken oder spröde Werkstoffe nur in Verbindung mit einer metallischen Matrix aufgetragen werden.

2.3 Eigenschaften des Thermischen Spritzprozesses

2.3.1 Vorgänge im Thermischen Spritzprozess

Ein thermischer Spritzprozess kann in vier charakteristische Phasen aufgeteilt werden:

1. Beim Eintritt in die Wärmequelle wird der Spritzzusatz an- oder aufgeschmolzen.
2. Durch Expansion des Prozessgases wird der Spritzzusatz zerstäubt und die daraus resultierenden Spritzteilchen werden beschleunigt.
3. In der Flugphase reagieren die Spritzpartikel durch Zusammenstöße untereinander und es treten Reaktionen mit der umgebenden Atmosphäre auf.
4. Beim Aufprall verbinden sich die Spritzteilchen untereinander sowie mit der Substratoberfläche

Das Thermische Spritzen ist ein stochastischer Prozess, d. h. jedes Spritzteilchen ist zeitlich geordneten, zufälligen Vorgängen unterworfen, wobei die physikalischen, chemischen und thermodynamischen Bedingungen variieren. Nach dem Aufschmelzen und Beschleunigen des Spritzzusatzes durch die Wärmequelle beschreibt jedes Spritzteilchen aufgrund seiner Masse, Dichte, Form und Geschwindigkeit eine andere Trajektorie im Flug. Aufgrund der großen Anzahl an möglichen Teilchenbahnen, ergeben sich bei einem Spritzprozess viele unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen

der Gasströmung und dem Teilchen, sowie zwischen dem Teilchen und dem Substrat [Lon04b]. In der Flugphase reagieren die Spritzteilchen durch das Zusammenstoßen untereinander oder durch eine Reaktion mit der umgebenden Atmosphäre. Die relevanten Reaktionen sind das selektive Verdampfen einer Komponente, die Reaktion von Metallverbindungen und die Bildung nicht flüchtiger Metallverbindungen wie Oxide, Nitride und Hydride bei Vorhandensein von O_2 , N_2 oder H_2 . Diese Reaktionen bewirken eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung und der Struktur der Spritzschichten [Kai04, SE08].

Die am häufigsten beobachtete Reaktion beim Thermischen Spritzen ist die oberflächliche Oxidation von Spritzteilchen in Umgebungsluft. Hierbei werden Oxide in die Grenzflächen zwischen den Schichtlamellen eingebunden, wodurch sich die Schichthärtigkeit und korrelierend die Verschleißfestigkeit erhöht. Bei zu hohen Anteilen an Oxiden in der Beschichtung versprödet diese allerdings, wodurch es zu einer schwachen interlamellaren Kohäsion kommt [Lei01]. Die kritische Oxidationstemperatur hängt von dem eingesetzten Spritzzusatz und dem Substratmaterial ab. Sie korreliert in der Regel mit der Reaktivität des Spritzzusatzes und seiner Schmelztemperatur. Generell oxidieren Spritzteilchen um so stärker, je heißer die Spritzflamme ist und je länger die Aufenthaltszeiten der Spritzteilchen in der Spritzflamme ist [Dav04]. Oxidationsreaktionen lassen sich minimieren, indem der Verbund Schicht-Substrat im Spritzprozess durch geeignete Kühlmaßnahmen unterhalb von 150°C - 200°C gehalten wird [Lon04b]. Die oberflächliche Oxidation ist besonders beim Thermischen Spritzen von sauerstoffaffinen Spritzzusätzen wie Eisenbasislegierungen problematisch. Beim Verspritzen derartiger Legierungen wird der Oxidation daher häufig durch Schutzgasummantelungen der Spritzflamme mit Inertgasen entgegengewirkt.

Beim Auftreffen auf die Substratoberfläche weisen die Spritzpartikel bestimmte kinetische und thermische Energien auf, die abhängig von dem verwendeten Spritzverfahren und Spritzzusatz sowie von den eingestellten Spritzparametern unterschiedlichste Werte einnehmen können. Die kinetische Energie der Spritzpartikel bei einer bestimmten Temperatur und Viskosität beeinflusst maßgeblich das Ausbreitungsverhalten der Partikel und damit deren resultierende Form beim Aufprall auf eine Substratoberfläche. Bei einer glatten Oberfläche breiten sich die Partikel radial aus, während bei einer aufgerauten Oberfläche die Richtung bevorzugt wird, bei der gegen die Oberflächenspannung die geringste Umformarbeit geleistet werden muss [Kai04]. Ein Ansteigen der Temperatur der Spritzteilchen bewirkt ein Absinken der Viskosität und führt zur Verringerung der benötigten Arbeit zur Ausbildung einer neuen Oberfläche. Beim Aufprall auf das Substrat kühlen die Spritzteilchen, aufgrund von Wärme-

leitung an die Atmosphäre und das Substrat unmittelbar ab. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie im Vergleich zum Teilchenvolumen eine große Oberfläche haben und in den Abmessungen um einige Dimensionen kleiner als das Bauteil sind. Typischerweise werden Erstarrungszeiten zwischen 10^{-8} bis 10^{-4} s erreicht [LB02,SE08]. Die Geschwindigkeit der Erstarrung hängt hierbei von vielen Randbedingungen wie der Teilchengröße, der Menge der pro Zeiteinheit auftreffenden Spritzteilchen, den Bauteildimensionen sowie den thermophysikalischen Eigenschaften des Spritzwerkstoffes ab.

Auf dem Substrat erstarrte Spritzteilchen weisen zwei unterschiedliche Morphologien auf. Bei einer hohen Plastizität des Spritzzusatzes bilden sich kreisförmige Spritzteilchen aus, die Pancake (Pfannkuchen) genannt werden. Dagegen bilden sich bei einer hohen Auftreffgeschwindigkeit und einer geringen Viskosität des Spritzzusatzes Spritzteilchen, die aus mehreren unzusammenhängenden Inseln bestehen und Flower (Blume) genannt werden. Bei einer weiteren Zunahme der kinetischen Energie tritt ein verstärktes Fließen und Zerspritzen sowie eine Coronabildung auf, die unterschiedlichste Erscheinungsformen haben kann [Dro92,Kai04,Lon04b,SE08].

2.3.2 Mikrostrukturelle Eigenschaften Thermischer Spritzschichten

Die Mikrostruktur Thermischer Spritzschichten ist durch eine Vielzahl instabiler und metastabiler Zustände gekennzeichnet, die durch extreme thermodynamische Bedingungen beim Aufschmelzen und Abkühlen der Spritzteilchen während der Flugphase und Reaktionen beim Aufprall auf das Substrat, sowie durch mechanische Einflüsse bei der Erstarrung, verursacht werden [Kai04]. Bei jedem Überlauf der Spritzpistole über das Substrat akkumulieren sich die Spritzteilchen und es bildet sich eine lamellare Schichtstruktur, die verfahrensbedingt einige mikrostrukturelle Besonderheiten aufweist [Lon04b]. Hierzu gehören Poren, Risse, Strahlmitteleinschlüsse, Oxidhäute, mangelhafte Schichthaftung, Schichtversagen, unerwünschte chemische Veränderung des Spritzwerkstoffes, Noppen und Spratzer [Lei01,SE08].

Poren sind eine unvermeidbare mikrostrukturelle Eigenschaft thermischer Spritzschichten. Ihre Entstehung ist an viele verschiedene Mechanismen im Spritzprozess gekoppelt, wie beispielsweise das Einschließen von Gasen, das Abschatten einzelner Teilbereiche oder aber sie bilden sich als Folge einer schwachen Schichtkohäsion [Dav04]. Abhängig von dem Spritzverfahren und dem Spritzzusatz unterscheiden sich die Poren deutlich in ihrer Größe [Cra04b]. Sowohl die Schichteigenschaften als auch die Bildung einer mehrlamellaren Struktur werden entscheidend durch die Porengröße,

-form und -verteilung beeinflusst [Dro92]. Die Porengröße ist hauptsächlich von der kinetischen Energie und der Viskosität der Spritzpartikel abhängig. Mit zunehmender Fließfähigkeit und Partikelgeschwindigkeit beim Aufprall verringert sich die Anzahl und Größe der Poren [Dro92, Lei01, SE08]. Es existieren unterschiedliche Porenformen, wie beispielsweise in die Schichtlamellen eingeschlossene Makro- und Mikroporen, oder Poren die sich an der Grenzfläche zwischen Schicht und Substrat befinden. Desweiteren treten interlamellare Poren und Poren, welche durch Unebenheiten der Substratoberfläche verursacht werden, auf. Viele Spritzzusätze weisen zudem, verursacht durch das Herstellungsverfahren, eine innere Porosität auf. Diese findet sich in der Regel ebenfalls in der Beschichtung wieder. Die Porosität kann durch die Wahl hochkinetischer Spritzverfahren bis auf Werte unterhalb von 1 % eingestellt werden. Um eine vollständig porenfreie Schicht zu erhalten, muss die Schicht allerdings durch thermische Verfahren nachbehandelt werden [Lon04a, Lon04d].

Bei einer schlecht aufeinander abgestimmten Werkstoffpaarung Schicht-Substrat, sowie bei einer falsch eingestellten Substrattemperatur, entstehen makroskopische Risse im Schichtgefüge. Häufig treten diese bei einer zu geringen Substrattemperatur oder bei einem zu hohen Abkühlungsgradient innerhalb der Schicht und einem spröden Schichtwerkstoff auf. Umgekehrt können sie aber auch initiiert werden, wenn sich das Substrat beim Beschichtungsvorgang übermäßig gegenüber der Beschichtung erwärmt. Hier führen unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Schicht und Substrat beim Abkühlen zu vertikalen oder horizontalen makroskopischen Rissen. Besonders parallel zur Substratoberfläche verlaufende Risse verringern die Festigkeit der Spritzschicht und sind daher zu vermeiden. Die Entstehung von mikroskopischen Rissen, sowohl innerhalb eines Spritzteilchens als auch zwischen den Spritzteilchen, kann nur geringfügig beeinflusst werden. Einzelne mikroskopische Risse beeinflussen die Funktionseigenschaft der Schicht im Regelfall nicht. Segmentartige Rissnetzwerke sollten jedoch vermieden werden, da sie zu einem Versagen der Schicht im Einsatz führen können [Lei01, Kai04, SE08].

Strahlmitteleinschlüsse, die bei der Vorbehandlung der Substrate durch falsch eingestellte Strahlparameter entstehen, haben hauptsächlich auf die Haftung der Spritzschicht einen Effekt. Sie können durch eine genaue Auswahl des Strahlgutes und eine Anpassung der Strahlparameter an den Spritzprozess und an das Substratmaterial vermieden werden [AH98, HB99, SRC⁺00, SE08].

Oxidhäute entstehen in der Flugphase der Spritzteilchen durch eine Reaktion mit der umgebenden Atmosphäre. Das Auftreten von Oxidhäuten kann sowohl positive als auch negative Einflüsse auf die Beschichtung haben. Zur Minimierung von Oxidhäu-

ten werden in der Literatur verschiedene Ansätze beschrieben. Häufig werden dem Spritzpulver oder -draht Desoxidationsmittel hinzugegeben [Sch04], Schutzgasatmosphären durch sogenannte „Shrouds“ realisiert [Bor91] oder der Spritzabstand verringert [Cra04b, SE08].

Eigenspannungen in Thermischen Spritzschichten entstehen typischerweise während des Beschichtungsvorgangs oder beim anschließenden Abkühlen des Schicht-Substrat Verbundes [Lon04b]. Während des Spritzprozesses werden Eigenspannungen induziert, da die schmelzflüssigen Spritzteilchen beim Aufprall auf das Substrat schlagartig erstarren und dabei kontrahieren. Ein vollständiges Zusammenziehen der Partikel ist aufgrund der Anwesenheit des Substrats oder bereits erstarrter Partikel nicht möglich, so dass Zugeigenspannungen in der Schicht entstehen. Daneben haben das Substrat und die Beschichtung häufig unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten. Dies führt beim Abkühlen zu thermischen Verspannungen, deren Ausprägung von dem Verhältnis der Wärmeausdehnungskoeffizienten, der Elastizitätsmodule der verwendeten Werkstoffpaarung und der Dicke der Beschichtung abhängig ist [GSR94]. Hat das Substrat einen höheren thermischen Ausdehnungskoeffizient als die Beschichtung, so treten beim Abkühlvorgang Druckeigenspannungen in der Schicht auf, wohingegen bei einem geringeren Ausdehnungskoeffizienten des Substrates Zugeigenspannungen in die Schicht induziert werden. Ein weiterer Effekt tritt vor allem bei der Verwendung von besonders harten Spritzzusätzen wie z.B. Wolframkarbid in Kombination mit weichen Substraten auf. Treffen die harten Partikel auf die weiche Substratoberfläche, verformt sich diese und, vergleichbar einem Kugelstrahlprozess, werden Druckeigenspannungen in das Substrat eingebracht [SE08].

Die tatsächliche Eigenspannung ist eine Überlagerung aller Effekte [ACSL05]. Durch hohe Eigenspannungen in der Beschichtung kann der Schichtverbund zerstört werden [SLBSS⁺06]. Unterschieden wird hier zwischen drei unterschiedlichen Versagensmechanismen. Beim Auftreten von Zugeigenspannungen oberhalb der Festigkeit der Schicht treten Wärmerisse senkrecht zur Substratoberfläche auf, die zu einem kohäsiven Versagen oder einem Ablösen der Schicht führen können. Dagegen bewirken übermäßige Druckeigenspannungen ein Abplatzen der Schicht. Weiterhin können sowohl Zug- als auch Druckeigenspannungen zu Bindungsfehlern innerhalb der Schicht oder zwischen Schicht und Substrat führen [BR98, SE08]. Seitens des Fertigungsprozesses kann Einfluss auf den Betrag und die Richtung der Eigenspannungen genommen werden und damit einhergehend, können Beschädigungen des Schichtverbundes weitgehend minimiert werden. Ermöglicht wird dies durch eine angepasste Auswahl der Werkstoffpaarung Schicht-Substrat hinsichtlich der Wärmeleitung und des ther-

mischen Ausdehnungskoeffizienten, durch geeignete Kühlverfahren im Spritzprozess, durch eine Probenvorwärmung sowie durch eine gesteuerte Wärmeeinbringung im Spritzprozess [ACSL05, GPS10].

Bei hochenergetischen Thermischen Spritzprozessen und thermosensitiven Spritzzusätzen kann es zu unerwünschten Reaktionen kommen. Beim Einsatz von karbidischen Spritzzusätzen führt eine hohe und lange Wärmeeinwirkung beispielsweise zu einer thermischen Zersetzung der Karbide. Als Resultat weisen die gespritzten Schichten einen deutlich verringerten Verschleißschutz auf. Beim Thermischen Spritzen metallischer Schichten bewirken zunehmende Temperaturen eine verstärkte Oxidation der Spritzpartikel, was sich wie im Vorhinein beschrieben vor- oder nachteilig auswirken kann [Lei01, Kai04, SE08].

Größere Unregelmäßigkeiten in Thermischen Spritzschichten entstehen durch lokale Fehlstellen des Schichtgefüges. Ursache dafür können Abbrandteilchen der Spritzpistole oder Anschmelzungen von Spritzzusatz an der Spritzpistole sein, die während des Spritzprozesses zyklisch angeschmolzen und wieder gelöst werden. Bei weiteren Überläufen der Spritzpistole über die Fehlstelle, setzt sich deren Gestalt fort und akkumuliert sich zu Noppen oder Pickeln auf der Schichtoberfläche. Hierdurch nimmt die Qualität der Spritzschicht, insbesondere in Bezug auf Maßgenauigkeit und Korrosionsschutz, deutlich ab [Lei01, SE08].

2.4 Optimierung Thermischer Spritzschichten

Die Herstellung hochqualitativer Thermischer Spritzschichten mit maßgeschneiderter Schichteigenschaften erfordert die systematische Untersuchung und anschließende Optimierung der Parameter im Spritzprozess. Dabei müssen eine Vielzahl an Einfluss- und Messgrößen berücksichtigt werden. Die wichtigsten Größen des Thermischen Spritzprozesses können in vier Gruppen unterteilt werden.

Die erste Gruppe beinhaltet die Parameter der Probenvorbehandlung. Hierzu gehören die Art und die Größe des Strahlgutes zur Probenaufrauung, sowie die Reinigung und das Vorwärmen des Substrates. Die zweite Gruppe enthält eine Vielzahl von Einstellgrößen im Spritzprozess (z.B. elektrische Leistung, Gaszusammensetzung, Verfahrkinematik) sowie die Eigenschaften der Spritzpartikel im Flug (z.B. Temperatur, Geschwindigkeit, Größe). Die dritte Gruppe umfasst die Eigenschaften der resultierenden Thermischen Spritzschicht. Diese können je nach Anwendungszweck völlig unterschiedlicher Art sein. Einige Beispiele hierfür sind die Schichtmorphologie

(z.B. Mikrostruktur, Porosität), die Schichttopographie (z.B. Rauheit, Welligkeit) sowie die Funktionseigenschaften (z.B. Härte, Verschleißfestigkeit, Korrosionsschutz) der Beschichtung. Die letzte Gruppe beinhaltet die Parameter der Probennachbehandlung, die abgestimmt auf den Nachbehandlungsprozess beispielsweise die Anpresskraft bei einem Walzprozess, die Schnittgeschwindigkeit bei einem Schleifprozess, oder die eingebrachte Wärmemenge bei einem Aufschmelzprozess sind. Die Gesamtheit der Prozessparameter, die das Beschichtungsergebnis beeinflussen, kann je nach Beschichtungsprozess über 50 Einflussgrößen betragen [GMC02]. Eine vollständige Schichtoptimierung ist daher äußerst komplex und kann nur mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand betrieben werden. In der Fachliteratur werden hierbei verschiedene Ansätze verfolgt.

Bei der klassischen Versuchsplanung wird eine One-Factor-at-a-Time (Ein-Faktor-zu-einer-Zeit) Methode verwendet. Bei dieser Vorgehensweise wird nur eine Prozessgröße variiert, während alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Dabei wird der Einfluss der variierten Größe auf das Beschichtungsergebnis untersucht [WJG99]. Die Beliebtheit dieser Vorgehensweise beruht darauf, dass komplexe Zusammenhänge auf ein eindimensionales Problem reduziert werden können. Damit können detaillierte Verläufe für diese eine Problemstellung erstellt und anschließend die Ergebnisse unabhängig voneinander analysiert werden. Der Nachteil dieser Methode ist, dass komplexe Zusammenhänge mit Mehrfachwechselwirkungen zwischen verschiedenen Prozessgrößen nur mit einem großen experimentellen Aufwand erfasst werden können.

Die moderne Versuchsplanung nutzt statistische Versuchsplanungsmethoden zur Optimierung von Thermischen Spritzschichten. Statistische Versuchsplanungsmethoden zeichnen sich dadurch aus, dass durch sie mit einem möglichst geringen experimentellen Aufwand ein größtmögliches Verständnis der Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Zielgrößen erreicht werden kann. Dabei werden qualitätsrelevante Faktoren identifiziert und optimale Niveaus der Faktoren für die optimierten Qualitätsmerkmale bestimmt. Im Gegensatz zur der One-Factor-at-a-Time Methode können mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung auch sich überlagernde Effekte analysiert werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil der statistischen Versuchsplanung. Hier werden die Versuchsparameter systematisch ausgewählt, so dass alle relevanten Effekte unabhängig voneinander geschätzt werden können. Wechselwirkende Prozessparameter, einschließlich Synergismen und Antagonismen, werden mit der statistischen Versuchsplanung ebenfalls erfasst. Als Ergebnis erhält man eine maximale Information pro Versuch [WJG99].

Der Großteil der Veröffentlichung in der Fachliteratur nutzt die klassische One-Factor-at-a-Time Methode, um Thermische Spritzschichten zu optimieren (z.B. [YW-CW95, WHPG99, MR05]). Dieses Verfahren ist in den Natur- und Ingenieurwissenschaften etabliert und führt seit vielen Jahren zu den gewünschten Ergebnissen. Besonders seit Ende des zwanzigsten Jahrhunderts lassen sich vermehrt Veröffentlichungen finden, in denen statistische Versuchsplanungsmethoden zur Optimierung von Thermischen Spritzschichten angewendet werden. Häufig ist das Bestreben hierbei, den Zeit- und Kostenaufwand für die Schichtoptimierung zu minimieren und ein genaueres Verständnis der physikalischen Wechselwirkungen im Prozess zu erhalten.

In den Anfängen der statistischen Versuchplanung wurden hauptsächlich Screening (Voruntersuchungs-) Versuchspläne angewendet, mit denen anhand einer geringen Anzahl an Experimenten die wesentlichen Einflussgrößen im Spritzprozess identifiziert werden können. Beim Einsatz von Screening Versuchsplänen werden allerdings nur lineare Zusammenhänge untersucht und daher ist eine Modellierung und Optimierung der Prozessgrößen nur sehr bedingt möglich.

In den vergangenen Jahren werden vermehrt umfangreichere Versuchspläne eingesetzt, mit denen eine tiefgreifende Untersuchung der Spritzprozesse möglich ist. Die am häufigsten angewandten Versuchspläne sind hierbei das Plackett-Burmann Design (z.B. [LYS⁺00, TVB⁺10]), die Taguchi Methode (z.B. [SSR⁺00, COBP07, BBR⁺08]), zweistufige teilfaktorielle und vollfaktorielle Versuchspläne (z.B. [SSS⁺00, GTMC04, PPT⁺07, JPP⁺08]) sowie die Response Surface Methode (Antwortflächenverfahren) (z.B. [VWS94, SJK⁺03, LJC07]). Zu der Response Surface Methode gehören das 3³Design, das Box-Behnke Design und das Central Composite (zentral Zusammengesetztes) Box-Wilson Design. Diese Versuchspläne ermöglichen die Überprüfung von linearen, quadratischen und wechselseitigen Effekten unter Verwendung von polynomialer Regression und erlauben dadurch eine genauere Untersuchung und Modellierung des Spritzprozesses [PPBC08].

2.5 Beschichtung komplexer Bauteile

In der Vergangenheit wurden viele Beschichtungsverfahren manuell durchgeführt, indem eine Spritz- oder Sprühpistole von einem Operator händisch über ein Bauteil verfahren und damit dessen Oberfläche beschichtet wurde. Die Beschichtungsqualität hing dabei stark von der Erfahrung, dem Geschick und der Konzentrationsfähigkeit des Operators ab [Cra04a]. Zur Verbesserung des Beschichtungsergebnisses sowie

zur Erhöhung der Beschichtungsgenauigkeit und -reproduzierbarkeit wurde die manuelle Beschichtung durch den Einsatz von Linearverfahreinheiten abgelöst. Linearverfahreinheiten können unkompliziert über CNC-Codes (Computerized Numerical Control) programmiert werden und bieten darüber hinaus die Möglichkeit mit hoher Genauigkeit Bauteile zu beschichten. Linearverfahreinheiten stoßen allerdings bei der Beschichtung komplexer Oberflächen an ihre Grenzen, da in der Regel nur drei zueinander senkrechte Achsen verfahren werden können und der Anstellwinkel der Spritzpistole nicht variabel ist. Da in den vergangenen Jahren die Komplexität der Bauteile stark zugenommen hat, ist heutzutage der Industrieroboter die Standardlösung zur Oberflächenbeschichtung. Industrieroboter haben in der Regel sechs unabhängig voneinander steuerbare Achsen [VKE94], wobei oft noch eine siebte externe Achse, in Form eines Drehtisches, genutzt wird. Damit können beliebig geformte Bauteiloberflächen gleichmäßig, mit hoher Präzision und guter Reproduzierbarkeit beschichtet werden, wodurch die Effizienz der Beschichtungsprozesse gesteigert wird [RA96].

Die Handhabung von Industrierobotern ist jedoch vergleichsweise kompliziert und aufwendig. Bei der Einführung von Industrierobotern wurden Beschichtungsbahnen hauptsächlich in Form von sogenannten Teach-in Prozessen (Manuelle Programmierung) generiert [Sch91, VKJ92, VKE94]. Hierbei wird von einem Bediener der Endeffektor (z.B. die Spritzpistole) entlang spezifischer Bahnen verfahren, welche mit einer Robotersteuerung gespeichert werden. Eine Erweiterung hiervon ist die point-to-point (Punkt zu Punkt) Methode. Bei dieser Methode wird ein Raster aus Punkten auf der Oberfläche aufgenommen und die so erhaltenen Stützpunkte werden über lineare Bahnen oder mathematische Funktionen (z.B. B-Splines [Ler81]) verbunden [Sch91, VKE94]. Der Nachteil der Teach-in Verfahren ist der verhältnismäßig hohe Programmieraufwand, bei dem in der Regel über mehrere Versuchsreihen die besten Stützpunkte ermittelt werden, sowie eine nur sehr geringe Übertragbarkeit der generierten Bahnen auf andere Oberflächen. Hierbei können die Kosten für den individuellen Teach-in Prozess einen großen Anteil an den Gesamtkosten des Bauteils betragen [SGGRS98]. Der Programmieraufwand lässt sich durch den Einsatz sensorgestützter Programmierung reduzieren. Bei diesen Verfahren wird die Oberfläche des Bauteils mit optischen 3D-Scannern eingelesen und die Bahn mit Hilfe spezieller Algorithmen geplant. Dadurch lässt sich der Zeitaufwand gegenüber den Teach-in Verfahren reduzieren. Die Bahnplanung kann allerdings ebenfalls nur sehr begrenzt auf andere Bauteile übertragen werden.

Da viele Produkte heutzutage nur noch eine geringe Lebensdauer haben, häufigen Design-Änderungen unterworfen sind und immer strengeren Qualitätsvorga-

ben gerecht werden müssen, sind die Kosten für die Durchführung von Teach-in Prozessen oder sensorgestützten Bahnplanungen inzwischen vielfach ökonomisch nicht mehr vertretbar [HNWY05]. Eine effizientere Bahnplanung kann durch Einsatz von Offline-Programmierungssoftware durchgeführt werden [VKJ92, MDV98, HN99, AVM02, DZT09]. Kommerziell stehen einige Offline-Programmierungstools von verschiedenen Roboterherstellern, wie ABB AG, Kuka Roboter GmbH und Reis Robotics GmbH, zur Verfügung [ABB10, KUK10, Rei10]. Diese Programme sind nicht standardisiert, haben aber in der Regel ähnliche Vorgehensweisen.

Ein CAD-Modell des zu beschichtenden Bauteils wird über 3D-Konstruktionsprogramme erstellt oder aber durch Einscannen des Bauteils mit speziellen optischen Sensoren [VKE94] generiert. Häufig wird das eingescannte Bauteil in einem nachfolgenden Schritt, mit dem Ziel unkompliziert eine Spritzbahn zu erstellen, in Segmente aufgeteilt [CX08]. Das CAD-Modell des Bauteils wird anschließend in die Offline-Programmierungssoftware importiert. Zusätzlich wird über CAD-Zeichnungen ein Abbild der Beschichtungszelle erstellt, um zusammen mit dem CAD-Modell die tatsächliche Beschichtungssituation nachzustellen. Der Verfahrensweg des Roboters auf der Bauteiloberfläche wird über Bahnplanungsoptimierungstools entwickelt und ebenfalls in das Programm importiert [DLZ⁺05, DLLC06]. Im Programm kann nun der Handhabungsablauf des Roboters nachgebildet werden, um damit etwaigen Problemen bei der Beschichtung, wie dem Auftreten von Singularitäten, kinematische Begrenzungen, Konfigurationsprobleme o.ä., entgegenzuwirken. Der gesamte Beschichtungsaufwand reduziert sich damit gegenüber Teach-in Prozessen erheblich, vor allem da in bestehende Beschichtungszellenmodelle beliebige Bauteile als CAD-Modelle importiert und Beschichtungssituationen variabel angepasst werden können. Gerade in der industriellen Produktion bietet dies große Vorteile. Standzeiten der Industrieroboter zur Justierung und Programmierung können durch Offline-Programmierung wesentlich gesenkt und so kostengünstig durchgeführt werden. Durch Einsatz von online Geschwindigkeits- und Temperaturmessungen zur Überwachung der Spritzprozessparameter kann darüberhinaus gewährleistet werden, dass Schwankungen im Prozess direkt erkannt und dadurch fehlerhafte Beschichtungen minimiert werden [CG06].

Die Beschichtung komplexer Oberflächen stellt allerdings auch für Industrieroboter eine hohe Anforderung hinsichtlich Kinematik und Dynamik dar. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene Forschungsprojekte durchgeführt, um die Anforderungen bei der Roboterbeschichtung mittels Thermischen Spritzens zu untersuchen und durch die Entwicklung spezieller Bahnplanungsalgorithmen Beschichtungsergebnisse

zu optimieren. Im Rahmen dieser Forschungsarbeiten zeigte sich, dass das robotergestützte Thermische Spritzen hauptsächlich durch die Parameter Anstellwinkel der Pistole zur Bauteiloberfläche, Abstand zwischen Pistole und Bauteiloberfläche, Abstand zwischen zwei Spritzbahnen, Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzpistole, Bauteilkontur und Bahnplanung der Spritzbahn beeinflusst wird [RA97, SGGRS98, CG09b]. Die hierbei ermittelten Zusammenhänge werden im Folgenden diskutiert.

2.5.1 Spritzwinkel

Der Anstell- oder Spritzwinkel α ist definiert als der Winkel zwischen der Bauteiloberfläche und dem Spritzstrahl (vgl. Abbildung 2.5). Bei der Beschichtung von Bauteilen wird in der Regel versucht, einen Spritzwinkel von $\alpha = 90^\circ$ zu realisieren [NG09]. Hierbei findet ein maximaler Energieübertrag der Spritzpartikel in die Bauteiloberfläche statt, da die Partikel senkrecht aufprallen. Bei der Beschichtung von komplexen Oberflächen ist es nicht immer möglich einen senkrechten Spritzwinkel einzustellen. Dieses hängt damit zusammen, dass die Spritzpistole an Bereichen mit Engstellen oder starken Richtungsänderungen in der Spritzbahn bei einem Spritzwinkel von 90° das Bauteil berühren würde. Geometriebedingt wird daher mit einem Anstellwinkel $\alpha < 90^\circ$ beschichtet. Ein derartiges Problem tritt beispielsweise bei der Innenbeschichtung von Zylindern auf [KNR98].

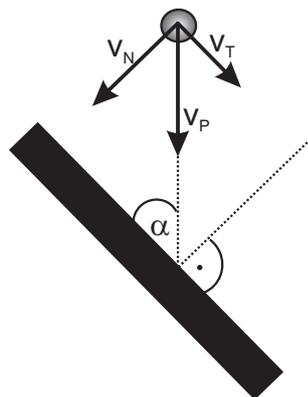


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Spritzwinkels α

Bei einem Spritzwinkel von $\alpha = 90^\circ$ weisen Spritzschichten unter der Voraussetzung, dass angepasste Beschichtungsparameter verwendet wurden, ein optimiertes Schichtgefüge auf [LB97, BNW04]. Dieses wird im Allgemeinen durch eine geringe Porosität, eine geringe Oberflächenrauheit, eine hohe Makro- und Mikrohärtigkeit, eine hohe Haftzugfestigkeit und eine hohe Bruchzähigkeit charakterisiert. Bei Anstellwinkeln $\alpha < 90^\circ$ verschlechtern sich jedoch die Schichteigenschaften. Ursache hierfür ist,

das Aufteilen der Partikelgeschwindigkeit v_P beim Aufprall auf die Bauteiloberfläche in eine Normalkomponente V_N und eine Tangentialkomponente V_T (vgl. Abbildung 2.5) [KNY06]. Die Normalkomponente V_N trägt zur Schichtbildung bei, während die Tangentialkomponente V_T zur Verschlechterung der Schichteigenschaften oder im schlimmsten Falle zu einem Abprallen der Spritzpartikel führt.

Der Einfluss des Spritzwinkels auf makro- und mikrostrukturelle sowie mechanische Schichteigenschaften an thermisch gespritzten Schichten wurde von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht. In den Arbeiten wurde beobachtet, dass zunächst bis $\alpha = 60^\circ$ die Schichteigenschaften relativ konstant bleiben, während unterhalb von $\alpha = 60^\circ$ ein Anstieg der Schichtporosität [HKF70, PLG85, IAL⁺97, SG98, CWZ01, KNY07] und der Schichtrauheit [HKF70, LB97, KNR98], sowie ein Absinken der Auftragsrate und der Haftzugfestigkeit auftritt [HKF70, AOMY86, MCS⁺94, AVM02, KNY07, GCF10]. Dies lässt sich auf den Aufbau Thermischer Spritzschichten zurückführen. Thermische Spritzschichten weisen grundsätzlich ein lamellares Gefüge auf. Die Lamellen richten sich im Spritzprozess senkrecht zum Spritzstrahl aus. Bei einem Spritzwinkel von $\alpha = 90^\circ$ ergibt sich somit ein dichtes, stapelweise gepacktes Gefüge mit Lamellen parallel zur Bauteiloberfläche. Weicht der Spritzwinkel α nur geringfügig von der senkrechten Konfiguration ab, so wurde festgestellt, dass sich das Schichtgefüge zunächst nicht signifikant verändert und sich die Schichtlamellen weiterhin parallel zur Bauteiloberfläche ausrichten. Unterhalb eines Anstellwinkels von ungefähr $\alpha = 60^\circ$ beginnen die Schichtlamellen quer durch die Schicht, bis hin zur Oberfläche, zu wachsen, wodurch die Schichtrauheit ansteigt [TP88, TMC⁺05c]. Dieser Effekt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die Spitzen des Rauheitsprofils den schräg auftreffenden Spritzstrahl teilweise abschatten [ZS01]. Neu auf das Bauteil auftreffende Partikel verteilen sich dadurch nicht mehr statistisch auf der Oberfläche, sondern verklammern sich hauptsächlich an den herausstehenden Spitzen. Als Konsequenz steigt die Oberflächenrauheit signifikant an. Durch den Abfall der Normalkomponente V_N und den gleichzeitigen Anstieg der Tangentialkomponente V_T der Partikelgeschwindigkeit verringert sich die mechanische Verklammerung der einzelnen Splats (Spritzteilchen). Damit geht ein Wachstum von Poren zwischen den einzelnen Splats einher [HMS⁺99]. Der Anstieg der Tangentialkomponente V_T bewirkt zusätzlich, dass zunehmend bei kleineren Spritzwinkeln, Spritzpartikel von der Oberfläche abprallen oder aber über die Oberfläche abgleiten und nur locker gebunden auf der Oberfläche verbleiben [KNR98]. Dies bewirkt einerseits einen deutlichen Abfall der Auftragsrate und andererseits eine zusätzliche Verschlechterung der Haftung zwischen den einzelnen Lamellen.

Die Veränderung der Schichteigenschaften bei Spritzwinkeln unterhalb von 90° wird

von verschiedenen Autoren auf die Form der auf dem Substrat erstarrten Splats zurückgeführt. Bei einem Spritzwinkel von 90° bilden sich in der Regel kreisförmige Splats. Wird der Spritzwinkel jedoch verringert, so nehmen die Splats die Form einer Ellipse an [MCS⁺94,MSB⁺97,SG97,FTCLX99,KVG⁺03] und der Massenschwerpunkt verschiebt sich vom Zentrum der Partikel zu dem der Spritzpistole abgewandtem Rand. Es bilden sich daher lokale Materialanhäufungen auf den Partikelrändern, die bei einem erneuten Aufprall eines Spritzpartikels eine Porenbildung begünstigen und die mechanische Verklammerung zwischen den Partikeln verschlechtern [BCM99]. Im Unterschied zu den makrostrukturellen Schichteigenschaften wird ein Anstieg der Elliptizität der Spritzpartikel allerdings schon ab einem Spritzwinkel von 80° beobachtet [KN06]. Der Grad, mit dem ein Spritzpartikel beim Aufprall auf die Bauteiloberfläche zerspritzt, ist dagegen nur geringfügig abhängig von dem Spritzwinkel und es kann keine eindeutige Tendenz festgestellt werden [KNY07].

Wird ein Spritzstrahl für einen gewissen Zeitraum senkrecht ($\alpha = 90^\circ$) auf eine Bauteiloberfläche gehalten, so erhält man ein Abbild der Partikeldichte im Spritzstrahl, das Spritzprofil genannt wird. Das Spritzprofil der meisten Spritzprozesse entsteht durch eine Überlagerung einer großen Zahl von Einflüssen (den Spritzpartikeln), bei der die einzelne Einflussgröße im Verhältnis zur Gesamtsumme einen unbedeutenden Beitrag liefert. Es kann daher in guter Näherung durch eine oder mehrere Gaußverteilungen beschrieben werden. Durch Aufsummation der einzelnen Einflüsse ergibt sich ein gaußförmiges Spritzprofil. Wird mit einem Spritzwinkel $\alpha < 90^\circ$ gespritzt, so treffen die Spritzpartikel nicht mehr gleichmäßig auf die Bauteiloberfläche auf und es bildet sich ein asymmetrisches Spritzprofil.

In Studien wurde ermittelt, dass mit abnehmendem Spritzwinkel die Asymmetrie im Spritzprofil zunimmt. Das Profil wird flacher und breiter, während sich gleichzeitig der Massenschwerpunkt des Profils von der Mitte zu der, der Spritzpistole zugewandten Seite verschiebt [TMC05b,TMC07]. Mathematisch wird dies durch die statistischen Parameter Schiefe und Kurtosis beschrieben. Es ist zu erwarten, dass durch die Verbreiterung des Spritzprofils Veränderungen in der Schichtmikrostruktur auftreten und das im Besonderen der Spannungszustand der Schichten verändert wird. Eine detaillierte Untersuchung dieses Zusammenhangs lässt sich allerdings in der Fachliteratur nicht finden. Nicht alle Spritzverfahren weisen bei einem Spritzwinkel $\alpha = 90^\circ$ ein ideal symmetrisches Spritzprofil auf. Durch eine radiale Pulvereindüsung (z.B. APS) beispielsweise ist das Profil bei einigen Verfahren bereits bei $\alpha = 90^\circ$ verkippt. Die Verkipfung weicht in den meisten Fällen nur wenige Grad von einem symmetrischen Spritzprofil ab. Bei derart asymmetrischen Profilen kann eine gezielte Änderung des

Spritzwinkels genutzt werden, um das Profil zu symmetrisieren [FWP92,FPW93].

Es gibt weitere relevante Größen im Spritzprozess, die sich auf das Ergebnis des Thermischen Spritzens mit unterschiedlichen Spritzwinkeln auswirken. Deren Einfluss hängt im Wesentlichen von der Art des verwendeten Spritzmaterials ab. Ilavsky et al. ermittelten experimentell, dass die Art des Spritzwerkstoffes einen großen Einfluss auf Änderungen des Schichtgefüges bei unterschiedlichen Spritzwinkel hat [IKN99]. Sie vermuteten, dass der Schmelzpunkt, die Fließeigenschaften und die thermische Leitfähigkeit der Materialien wesentlich die Sensitivität des Werkstoffes bestimmt. Die größte Sensitivität zeigten Werkstoffe mit einem hohen Schmelzpunkt, geringen Fließeigenschaften und einer geringen thermischen Leitfähigkeit. Bei diesen Werkstoffen verformen sich die Partikel beim Aufprall auf das Substrat nur geringfügig, wodurch es auch nur zu einer geringen Veränderung der Splatform bei Spritzwinkeln $\alpha < 90^\circ$ kommt. Allerdings prallen derartige Partikel mit einer höheren Wahrscheinlichkeit von der Bauteiloberfläche zurück, woraufhin die Auftragsrate überdurchschnittlich absinkt. Ein Teil der Partikel gleitet über die Bauteiloberfläche ab, verklammert sich locker an Unebenheiten der Schicht- oder Bauteiloberfläche und wird wieder beim nächsten Überlauf überspritzt. Als Konsequenz verringert sich die Haftung des Schichtverbundes deutlich und es entstehen Partikelagglomerate an der Lamellenoberfläche, die bei jedem weiteren Pistolenüberlauf reproduziert bzw. verstärkt werden und dadurch die Schichtrauheit ansteigen lassen.

Montavon et al. beobachteten, dass die Kornfraktion des Spritzpulvers einen Einfluss auf Verschlechterungen der Schichteigenschaften bei Spritzwinkeln $\alpha < 90^\circ$ hat [MSB⁺97]. Sie zeigten, dass die größten Pulverpartikel im Spritzpulver bei Spritzwinkeln $\alpha < 90^\circ$ vom Substrat zurückprallen, da sie im Vergleich zu der restlichen Pulverfraktion nur geringfügig angeschmolzen sind und gleichzeitig, verursacht durch ihre hohe Masse, einen hohen Impuls haben. Dabei prallt ein um so höherer Anteil an Partikeln von der Bauteiloberfläche zurück, je geringer der Spritzwinkel ist. Spritzpulver mit einer breiten Pulverfraktion reagieren somit weniger empfindlich auf Änderungen des Spritzwinkels. Bei einer Verringerung des Spritzwinkels prallen zuerst die größten Partikel von der Bauteiloberfläche zurück. Mit zunehmender Verringerung des Spritzwinkels prallen kleinere Partikel ebenfalls von der Bauteiloberfläche ab, bis bei einem sehr spitzen Spritzwinkel auch die kleinsten Partikel zurückgeworfen werden [LLW03]. Bei Spritzpulvern mit einer engen Pulverfraktion zeigt sich dementsprechend in einem kleineren Bereich ein Übergang zwischen guten und schlechten Schichteigenschaften. Bei einem Großteil der Arbeiten kann kein deutlicher Unterschied zwischen der Sensitivität von lichtbogen- und atmosphärisch plasma-

gespritzten Schichten auf Änderungen des Spritzwinkels festgestellt werden. Smith et al. beispielsweise untersuchten lichtbogen- und atmosphärisch plasmagespritzte Kupfer, Aluminiumoxid, Molybdän, Nickel-Aluminium und Aluminium Schichten. Sie konnten zeigen, dass bei beiden Spritzverfahren ein vergleichbarer Abfall der Auftragsrate, bei einer Verringerung des Spritzwinkels, auftritt [SN94]. Ein Unterschied lässt sich jedoch bei kaltgasgespritzten Schichten beobachten. Hierbei schmelzen die Partikel im Spritzprozess nicht komplett auf, was zu einem wesentlich abrupteren Übergang zwischen hohen und sehr niedrigen Auftragsraten führt [LLW03].

2.5.2 Spritzabstand

Der Spritzabstand S ist definiert als Abstand zwischen Substratoberfläche und Düsen-Austrittsöffnung der thermischen Spritzpistole (Abbildung 2.6). Der Spritzabstand hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Schichtmorphologie und -topographie sowie die mechanischen und tribologischen Schichteigenschaften. Die Ursache dafür ist das unterschiedliche Temperatur- und Geschwindigkeitsprofil der Spritzpartikel bei verschiedenen Spritzabständen, sowie die steigende Aufenthaltsdauer der Spritzpartikel in der thermo-kinetischen Brennerflamme. Dadurch gehen die Spritzpartikel bis zum Aufprall auf die Substratoberfläche vielfältige physikalische und chemische Wechselwirkungen mit der Brennerflamme und der umgebenden Atmosphäre ein [BBBV00].

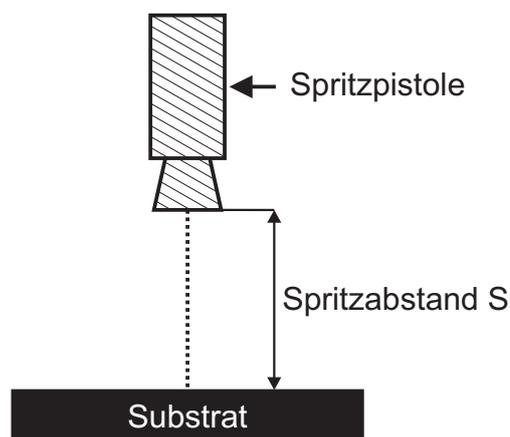


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des Spritzabstandes S

Die komplexen Vorgänge beim Thermischen Spritzen mit unterschiedlichen Spritzabständen werden im Folgenden anhand des Atmosphärischen Plasmaspritzens erklärt. Bei anderen Thermischen Spritzprozessen, wie dem Lichtbogenspritzen, treten korrespondierende Verläufe auf [HSH98, MCGAD03, LZB⁺05, NGN05, TVA⁺08b].

Beim Austritt aus der Spritzbrennerdüse eines Atmosphärischen Plasmabrenners hat

das Plasmagas seine höchste Temperatur und Geschwindigkeit. Mit zunehmendem Spritzabstand fallen sowohl die Gastemperatur als auch die Gasgeschwindigkeit durch Konvektion und Stoßvorgänge mit der Umgebungsluft stetig ab. In die Plasmaflamme eingedüste Spritzzusätze werden durch die Plasmagasströmung beschleunigt und erwärmt. Verursacht durch ihre träge Masse und ihre spezifische Wärmeleitfähigkeit nehmen die Spritzzusätze nicht unmittelbar die gesamte kinetische und thermische Energie der Gasströmung auf, sondern benötigen dazu ein werkstoff- und brennerspezifisches Weg- und Zeitintervall. Nach Erreichen der maximalen Geschwindigkeit und Temperatur überwiegt die Reibung der Umgebungsluft gegenüber dem Impuls der Gasströmung, so dass die Spritzpartikel verzögern und ihre Geschwindigkeit absinkt. Parallel dazu verlieren die Partikel ihre thermische Energie durch Wärmestrahlung und Konvektion, wodurch sie abkühlen und langsam erstarren [SSM00, MR05]. Ein schematischer Verlauf der Temperatur- und Geschwindigkeitsvorgänge in der Plasmaflamme ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

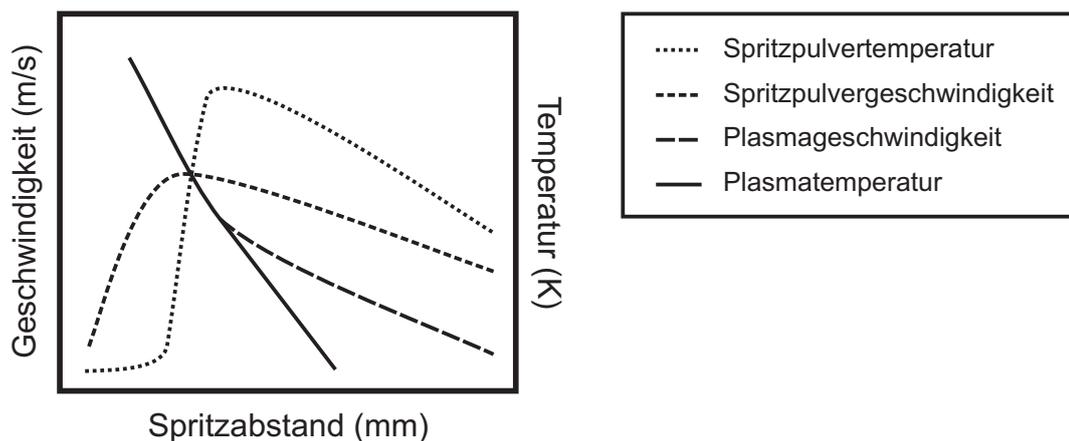


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Temperatur und Geschwindigkeit der Plasmaflamme und der Spritzpulver beim Plasmaspritzen als Funktion des Spritzabstandes [SALK08].

Die thermo-kinetischen Wechselwirkungen der Spritzpartikel mit der Spritzflamme spiegeln sich in den Eigenschaften der thermischen Spritzschichten wieder. Bei sehr kleinen Spritzabständen treffen die Spritzpartikel zunächst unzureichend angeschmolzen und mit einer geringen kinetischen Energie auf das Substrat auf [SALK08]. Beim Aufprall auf die Substratoberfläche verteilen sich die Spritzpartikel daher weitläufig und es entstehen Fehlstellen im Schichtgefüge und Gasblasen aus der Umgebungsluft werden eingebaut. Die Schichten weisen daher ein lockeres Schichtgefüge mit runden, ungeschmolzenen Partikeln, einer hohen Porosität, einer hohen Rauheit, einer geringen Härte und einer geringen Kohäsion zwischen den Partikeln auf [WLLY10]. Zusätzlich dringt bei sehr kleinen Spritzabständen die Spritzflamme in die Substrat-

oberfläche ein und überhitzt diese. Als Folge bilden sich thermische Verspannungen des Schichtgefüges, die zu Hitzerrissen beim Abkühlen der Schichten führen können [FCVG88, ZG88, KSS91, AVM02, TMC05a, SALK08]. Eine Vergrößerung des Spritzabstandes verlängert die Aufenthaltszeit der Spritzpartikel in der Spritzflamme. Die thermische und kinetische Energie der Spritzpartikel steigt an. Durch ihre nun höhere Temperatur haben die Spritzpartikel eine geringere Dichte und Viskosität [Paw08]. Sie breiten sich dadurch beim Aufprall auf dem Substrat stärker aus, so dass Fehlstellen und Hohlräume geschlossen werden und sich dichtere Schichten mit einer höheren Kohäsion bilden [WLLY10]. Charakteristisch ist der Abfall der Porosität und der Rauheit sowie ein Anstieg der Schichthärte und Haftzugfestigkeit bis zum optimalen Spritzabstand [AOMY86, GUSNK97, KBSL00, TMC05b]. Ab einem gewissen Spritzabstand dringt die Spritzflamme nicht mehr in das Substrat ein und die Substrattemperatur sinkt stetig ab [BIC02, BBL03, XZWY09]. Dieses geht einher mit einem Absinken der thermischen Eigenspannungen im Schichtverbund [KBSL00]. Wird der Spritzabstand weiterhin vergrößert, haben die Spritzpartikel nur noch geringe Enthalpien und Partikelgeschwindigkeiten und beginnen im Flug zu erstarren. Unter derartigen Bedingungen flachen die Partikel beim Aufprall nicht mehr adäquat ab und folglich bilden sich raue und porige Schichten mit einer schwachen kohäsiven Haftung und einer geringen Härte [GUSNK97, Cor99, Sar05, TMC07, VSY⁺09]. Diese Verschlechterung der Schichtqualität hat Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Schichten, z.B. durch eine Verringerung der Bruchzähigkeit [WLW06]. Hinzu kommt, dass mit zunehmendem Spritzabstand die Spritzpartikel eine längere Verweilzeit im Spritzstrahl haben und daher mehr Reaktionen mit Gasen der Umgebungsluft eingehen [BS99]. Dadurch werden Oxidationen und Degradierungen der Spritzpartikel bewirkt, die mit zunehmendem Spritzabstand auf ein werkstoffspezifisches Maximum ansteigen [AOMY86, Cra04b, LLW05].

Bei der Beschichtung mit unterschiedlichen Spritzabständen ändert sich die Geometrie des Spritzprofils. Da Thermische Spritzprozesse einen konstanten Öffnungswinkel der Spritzflamme aufweisen, bewirkt eine Vergrößerung des Spritzabstandes eine geometrische Verbreiterung der beschichteten Fläche. Als Folge sinkt die Partikeldichte im Spritzstrahl und das sich auf der Substratoberfläche einstellende Spritzprofil wird breiter und flacher [TMC07, AGM⁺08]. Dieser rein geometrische Vorgang ist jedoch an die thermischen und kinetischen Vorgängen im Spritzstrahl gekoppelt, so dass bei vielen Werkstoffen zunächst die Schichtdicke bis zum optimalen Spritzabstand ansteigt oder konstant bleibt und erst oberhalb dessen der geometrische Einfluss überwiegt und die Schichtdicke abfällt [TMC05b, VSY⁺09].

Der optimale Spritzabstand kann nicht pauschal für verschiedene Spritzverfahren und Spritzzusätze angegeben werden, da zahlreiche Randbedingungen wie die Art des Spritzverfahrens, die Art, Form und Fraktion des Spritzzusatzes und die Art und Dimension des zu beschichtenden Bauteils den individuellen Spritzabstand beeinflussen. Der optimale Spritzabstand jedes Thermischen Spritzverfahrens liegt jedoch in einem relativ engen und für den Spritzprozess charakteristischen Bereich. Für das Atmosphärische Plasmaspritzen und das Lichtbogenspritzen werden beispielsweise Spritzabstände zwischen 100 mm und 150 mm empfohlen [Sar05]. Nach Ermittlung des optimalen Spritzabstandes sollte dieser bei allen Beschichtungen konstant gehalten werden, um deutliche Qualitätsschwankungen in der Beschichtung zu verhindern [Lon04b].

2.5.3 Bahnabstand

Beim Thermischen Spritzen werden Bauteile durch eine Verfahrung des Spritzbrenners entlang ihrer Oberfläche beschichtet. Bei der am häufigsten verwendeten Bahnstrategie überfährt der Brenner die Bauteiloberfläche mäanderförmig und wendet jeweils außerhalb des Bauteils. Die Spritzbahnen verlaufen dabei parallel und haben einen konstanten Abstand zueinander, den Bahnabstand B (Abbildung 2.8).

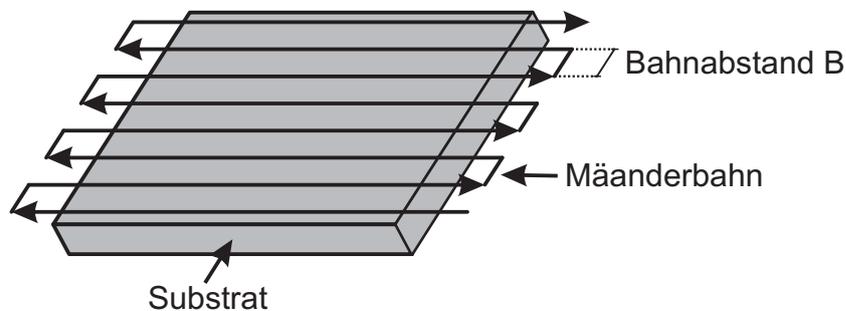


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Bahnabstandes B

Der Einfluss des Bahnabstandes auf die Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten ist bislang nur unzureichend untersucht. In der Fachliteratur finden sich hierzu nur wenige Veröffentlichungen. Häufig wird der Bahnabstand konstant gehalten und andere Parameter des Spritzprozesses werden untersucht. Einen ersten Anhaltspunkt zur Wahl des richtigen Bahnabstandes gibt das Handbuch der Thermischen Spritztechnik. In diesem Handbuch wird ein Bahnabstand von einer halben Spritzprofilbreite empfohlen, um gleichmäßige Schichtdicken und glatte Schichtoberfläche zu erzielen [Lon04b]. Auch das Handbuch für Ingenieure der Thermischen Spritztechnik, der

U.S. Army Corps of Engineers empfiehlt einen Bahnabstand von ca. 40% der Spritzprofilbreite [Cor99]. Dies sind allerdings beides Empfehlungen, die aus der praktischen Erfahrung des Anwenders resultieren und nicht die Ergebnisse wissenschaftlicher Studien repräsentieren.

Die Wahl des Bahnabstandes ist besonders wichtig bei der Thermal Spray Shape Deposition (Thermisches Spritzen Formbeschichtung). Hierbei werden Bauteile mit einer Dicke von einigen Zentimetern durch Verwendung der Thermischen Spritztechnik hergestellt, wodurch der Bahnabstand einen besonders großen Einfluss auf die Konturgenauigkeit der Schichtoberfläche hat. Falsch eingestellte Bahnabstände verursachen Fehler im Schichtgefüge, die sich akkumulieren und zu einer starken Welligkeit der Bauteiloberfläche führen. Bei der Thermal Spray Shape Deposition werden Bahnabstände in der Größenordnung einer Standardabweichung des Spritzprofils verwendet. Besonders bei gaußförmigen Spritzprofilen führt dieses zu glatten und spannungsfreien Schichten [FWP92, WPA92].

Gleichmäßige Schichtdicken mit einer geringen Welligkeit lassen sich auch dann erzielen, wenn mit einem Bahnabstand gearbeitet wird, der kleiner als eine Standardabweichung des Spritzprofils ist. Bei kleinen Bahnabständen muss jedoch beachtet werden, dass die Schichtdicke und der lokale thermische Energieeintrag in das Substrat ansteigen und dadurch übermäßige Verspannungen der Beschichtung auftreten können. Ein Lösungsansatz ist hier die Kombination eines geringen Bahnabstandes mit einer entsprechend höheren Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzpistole [FWP92, WPA92].

Ein zweiter Ansatz zur Erzeugung glatter Schichtoberflächen ist die Wahl eines verhältnismäßig großen Spritzabstandes in Verbindung mit einem geringen Bahnabstand. In diesem Fall ergibt sich eine breite Verteilung des Spritzstrahls auf dem Substrat mit einer großen Überlappung zwischen zwei Spritzprofilen [FWP92, WPA92]. Diese Vorgehensweise lässt sich nur bei dünnen Schichten anwenden. Bei größeren Schichtdicken akkumulieren sich geringste Unebenheiten des Substrates oder der Beschichtung zu einer welligen Schichtoberfläche. Aus den in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Gründen ist die Wahl eines großen Spritzabstandes jedoch zur Erzielung einer qualitativen Schicht nicht zielführend.

Schichtoberflächen mit einer hohen Welligkeit treten immer dann auf, wenn der Bahnabstand größer als eine Standardabweichung des Spritzprofils gewählt wird. Dieses ist besonders dann signifikant, wenn das Spritzprofil von einer idealen Gaußverteilung abweicht. Durch die Wahl eines größeren Bahnabstandes kann jedoch das Temperaturprofil auf der Substratoberfläche positiv beeinflusst werden. Durch einen breiteren Bahnabstand ergibt sich eine gleichmäßigere Aufheizung des Substrates, wobei keine

Änderung der totalen Substrattemperatur festgestellt werden kann [ZXW⁺08].

2.5.4 Verfahrensgeschwindigkeit

Die Verfahrensgeschwindigkeit V (Abbildung 2.9) ist definiert als die Relativgeschwindigkeit zwischen der Spritzpistole $V_{brenner}$ und der Bauteiloberfläche $V_{substrat}$. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Schichtdicke wird die Spritzpistole in einem Beschichtungsvorgang mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit über die gesamten Bauteiloberfläche bewegt. In den meisten Veröffentlichungen wird der Einfluß der Verfahrensgeschwindigkeit auf das Beschichtungsergebnis nicht näher untersucht. Typischerweise wird sie als fester Parameter vorgegeben und andere Größen des Spritzprozesses werden variiert. Die Verfahrensgeschwindigkeit ist für die Bahnplanung jedoch ein wesentlicher Einstellparameter, da über die Verfahrensgeschwindigkeit die Schichtauftragung pro Überlauf sowie der thermische Eintrag in das Substrat gesteuert werden kann.

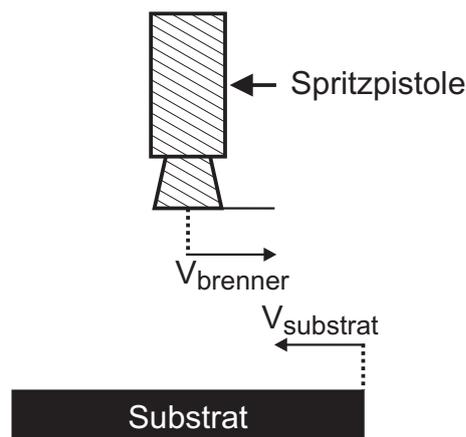


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Verfahrensgeschwindigkeit $V = V_{brenner} + V_{substrat}$

Mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit sinkt die Schichtauftragung typischerweise ab. Dieser Zusammenhang wurde bereits in einigen Veröffentlichungen beschrieben [ZXW⁺08, AGM⁺08]. Eine detaillierte Beschreibung lässt sich jedoch nur in den Arbeiten von Trifa et al. finden [TMC07]. Sie beobachteten einen exponentiellen Zusammenhang zwischen der Auftragsrate und der Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzpistole für APS gespritzte $Al_2O_3 - 13(TiO_2)$ Schichten. Besonders unterhalb einer Verfahrensgeschwindigkeit von 200 mm/s zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Schichtdicke, der auf erhöhte Substrattemperaturen bei geringeren Verfahrensgeschwindigkeiten und dadurch verursacht, auf eine bessere Haftung der Spritzteilchen auf dem Substrat

zurückgeführt wurde. Oberhalb von 200 mm/s konnte der Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Verfahrgeschwindigkeit hingegen auch in guter Näherung durch einen linearen Zusammenhang beschrieben werden.

Eine Abnahme der Verfahrgeschwindigkeit bewirkt einen lokalen Temperaturanstieg der Beschichtungsbahn [BIC02, FH02, BBR04, GDRJ06, CG09b, WIL10]. Als Folge davon stellt sich ein steiler Wärmegradient zwischen der aufgeheizten Bahn und dem dazu verhältnismäßig kaltem Substrat ein [ZXW⁺08]. Dies löst eine thermisch induzierte Verspannung des Schichtgefüges aus [CG09a], die teilweise zu einer Ausbildung von Hitzerissen führt [LVS05, TVF05]. Wagenknecht beispielsweise beobachtete einen progressiven Temperaturanstieg mit abnehmender Verfahrgeschwindigkeit [Wag02]. Als Konsequenz daraus sollte eine minimale Verfahrgeschwindigkeit nicht unterschritten werden, um zu verhindern, dass sich die Schichtqualität durch thermische Verspannungen deutlich verschlechtert. Oberhalb dieser minimalen Verfahrgeschwindigkeit treten hingegen nur geringfügige Änderungen der Substrattemperatur auf [XZWY09]. Ist die Verfahrgeschwindigkeit zu hoch eingestellt, so kühlt die Bauteiloberfläche im Beschichtungsprozess ab und die Spritzpartikel zerspritzen übermäßig beim Aufprall. Dem kann durch eine angepasste Vorwärmung des Substrates entgegengewirkt werden [LDV03].

Eine Empfehlung zur Ermittlung der korrekten Verfahrgeschwindigkeit wird durch das Handbuch der Thermischen Spritztechnik gegeben. Demnach sollte die Verfahrgeschwindigkeit so gewählt werden, dass pro Überlauf eine Schichtdicke von ca. 25 µm aufgetragen wird. Ausnahmen bilden hier lichtbogengespritzte Schichten mit Auftragsraten bis zu 125 µm pro Überlauf oder hochverschleißfeste Schichten mit Auftragsraten unterhalb von 12,5 µm [Lon04b].

2.5.5 Bauteilkontur

Mit der Thermischen Spritztechnik können beliebige Bauteilgeometrien beschichtet werden, solange auf dem gesamten Bauteil eine Sichtlinie zwischen dem Spritzbrenner und der zu beschichtenden Bauteiloberfläche realisiert werden kann. Die maximalen Bauteilabmessungen sind zum einen durch die Erreichbarkeit des Handhabungssystems und der Größe der Absaugvorrichtung, zum anderen durch die Abmessungen des Spritzstrahls begrenzt. Bauteile, die kleinere Abmessungen als den Durchmesser des Spritzstahls haben, können nur dann gleichmäßig beschichtet werden, wenn sie eine ebene Oberfläche aufweisen. In diesem Fall kann eine gute Schichtqualität erzielt werden, da das Spritzprofil in der Regel die höchste Porosität und die größte Ver-

schmutzung durch Oxide an den äußeren Flanken aufweist [Lon04b]. Die Wandstärke des Bauteils sollte 1 mm nicht unterschreiten, damit durch einen Wärmestau kein thermischer Verzug des Bauteils auftritt [Moe97]. Bei der konstruktiven Auslegung müssen zur Vorbereitung auf einen Thermischen Spritzprozess einige Randbedingungen berücksichtigt werden. Rechtwinkelige Ecken und Nuten sollten vermieden werden, da hier mit ungleichmäßigen Schichtdicken und -qualitäten zu rechnen ist. Dieses Phänomen ist bei Nuten mit Abmessungen größer als $\varnothing \sim 1 - 2 \text{ mm}$ besonders prägnant [HMS⁺99]. Konstruktionen, bei denen Ecken oder Nuten durch Radien größer 5 mm oder Winkel kleiner 30° approximiert werden, sind daher vorzuziehen [Sul05].

Trotz Berücksichtigung dieser Konstruktionsmaßnahmen stellen sich aus unterschiedlichen Gründen nicht immer die gewünschten Schichteigenschaften ein. Auf gekrümmten Bauteiloberflächen weicht beispielsweise die Verfahrgeschwindigkeit der Spritzpistole häufig von dem voreingestellten Wert ab. Ein Grund hierfür ist, dass bei drastischen Änderungen der Bauteilkontur und damit des Normalenvektors der Bauteilkontur, die Bahngeschwindigkeit der Spritzpistole durch das dynamische Verhalten des Beschichtungsroboters begrenzt wird [AT97]. Dabei beschränkt die langsamste, zur Bewegung beitragende Achse des Roboters, die maximale Beschleunigung und Bahngeschwindigkeit der Spritzpistole. Als Folge stellt sich eine ungleichmäßige Schichtdicke ein. Die hohe Beschleunigung der einzelnen Achsen des Roboters kann zusätzlich zu einem Schwingen der Spritzpistole führen, wodurch die Konturgenauigkeit im Spritzprozess verloren geht [HKM94, ZS04]. Dieser Problematik kann nur durch eine gleichzeitige Berücksichtigung von Bahnplanungsstrategie und Roboterkinematik entgegengewirkt werden [HNWY05].

Desweiteren können durch das hohe Gewicht der Spritzpistole und des Kabelpaketes Trägheitseffekte auftreten, die die Beschleunigungs- und Verzögerungsphase des Roboters verlängern. Die hierdurch verursachten Effekte sind äußerst komplex und daher Gegenstand verschiedener Forschungsaktivitäten (z.B. [KHSS08, KS09, KS10]). Ein erster Ansatz zur Minimierung von unerwünschten dynamischen Effekten des Roboters bei der Bauteilbeschichtung findet sich in den Arbeiten von Fang et al. [FDLC10]. Anhand von Beschichtungsversuchen an einem Demonstratorbauteil (ein rechtwinkelig gebogenes Blech) konnten sie zeigen, dass bei einer genauen Anpassung des Handhabungsgewichts des Industrieroboters (Modell: ABB, IRB4400_45, Handhabungsgewicht: 45 kg) an den Spritzprozess (Gesamtgewicht der Spritzpistole: 9,7 kg) nur geringe dynamische Effekte, wie z.B. unerwünschte Schwankungen der Verfahrgeschwindigkeit, auftreten. Dies gilt allerdings nur bei der Beschichtungen von Bauteilen mit einer sehr geringen Geometriekomplexizität und unter den Randbedingungen,

dass der Roboter nicht in der Nähe von kinematischen Grenzen oder unter Einsatz hoher Achsgeschwindigkeiten arbeitet. Hingegen treten bei der Beschichtung von Bauteilen mit einer komplex geformten Geometrie ausgeprägte dynamische Effekte auf, die bei der Bahnplanung berücksichtigt werden müssen [KS10].

2.5.6 Bahnstrategie

Ein Großteil der Beschichtungen beim Thermischen Spritzen werden durchgeführt, in dem die Spritzpistole mit einer mäandrierenden Bahn über die Bauteiloberfläche verfahren wird. Dabei wird soweit möglich, der Spritzwinkel, der Spritzabstand, der Bahnabstand und die Verfahrgeschwindigkeit konstant gehalten. Bei der Beschichtung komplexerer Oberflächen wird die mäandrierende Bahn auf die Bauteiloberfläche projiziert [HKM94, MG10].

Die Beschichtungsbahn wird darüberhinaus derart geplant, dass Wendewege der Spritzpistole außerhalb des Bauteils vollführt werden. Trifa et al. geben einen Anhaltspunkt für die richtige Wahl des Beschleunigungsweges der Spritzpistole. Sie ermittelten beim Einsatz eines Industrieroboters der Firma ABB, Modell 2400, dass unterhalb einer Verfahrgeschwindigkeit von 300 mm/s ein Beschleunigungsweg von 30 mm, bei 300 mm/s von 40 mm und oberhalb von 300 mm/s von 60 mm außerhalb des Bauteils benötigt wird, um eine konstante Verfahrgeschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche gewährleisten zu können [TMC07].

Dieselbe Beschichtungsbahn kann bei unterschiedlichen Positionen und Orientierungen des Beschichtungsroboters zu verschiedenen Ergebnissen im Beschichtungsprozess führen. Fang et al. ermittelten, dass die gleiche Bahntrajektorie zu unterschiedlichen Schichtdicken führt, abhängig davon mit welcher Achse des Beschichtungsroboters die Verfahrgeschwindigkeit der Spritzpistole umgesetzt wird. Die besten Ergebnisse erhielten sie, wenn ein Großteil der Geschwindigkeit mit der Achse sechs bereitgestellt wird [FDLC10]. Dies liegt darin begründet, dass mit dieser Achse die höchste Winkelgeschwindigkeit erzielt werden kann. Allerdings muss beim Einsatz der Achse sechs berücksichtigt werden, dass diese Achse in der Regel durch die kleinsten Getriebe angetrieben wird und daher eine Schwachstelle des Roboters darstellt. Zudem kann die hohe Verfahrgeschwindigkeit der Achse sechs nur bei einer entsprechenden Anpassung des Versuchsaufbaus effektiv genutzt werden.

Besonders bei der Beschichtung komplexer Bauteile mit starken Änderungen der Bauteilkontur sollte die Bahnstrategie an das Bauteil angepasst werden [WGP⁺90]. An steilen Kanten muss der Roboter beim Einsatz einer konventionellen Bahnstrategie

drastische Änderungen der Anstellung der Spritzpistole an die Bauteiloberfläche vollführen, um der Bauteiloberfläche mit einem rechtwinkligen Spritzwinkel zu folgen. Als Resultat verlangsamt sich die Bahngeschwindigkeit und es bilden sich dicke, thermisch verspannte Schichten. Einen möglichen Lösungsansatz liefern Fang et al. Sie änderten den Spritzwinkel schrittweise bei Annäherung an Bereiche mit einer hohen Bauteilkomplexizität und konnten dadurch eine deutlich konstantere Bahngeschwindigkeit bei der kritischen Umorientierung der Spritzpistole erreichen [FDLC10]. Generell kann eine durch die Bauteilgeometrie notwendige Änderung des Spritzwinkels, des Spritzabstandes, des Bahnabstandes oder der Verfahrgeschwindigkeit durch jeweils eine der anderen drei konstanten Größen bis zu einem gewissen Grad kompensiert werden. So zeigen verschiedene Studien, dass einem Abfall der Schichtdicke, bei einer Änderung des Spritzwinkels, durch eine entsprechend geringere Verfahrgeschwindigkeit entgegengewirkt werden kann [CGL04,CG06].

Der Einsatz von alternativen Beschichtungsstrategien gegenüber der konventionellen mäanderförmigen Bahnstrategie wird in einigen Fachbeiträgen diskutiert. Die Motivation ist hier in allen Fällen die Erzielung einer gleichmäßigen Schichtdicke, einer gleichmäßigen Aufheizung des Substrates und damit der Verminderung von thermischen Eigenspannungen.

Grant et al. empfehlen den Einsatz einer sogenannten „Mirror-Box“ Bahn (vgl. [GDRJ06]). Beim Einsatz dieser Bahn verläuft der Beschichtungsvorgang nicht von einer zur anderen Seite des Bauteils, sondern es werden abwechselnd gegenüberliegende Bereiche der Bauteiloberfläche beschichtet. Dadurch kann eine gleichmäßige Aufheizung des Substrates erreicht und thermische Eigenspannungen minimiert werden.

Gadow et al. konnten durch Einsatz einer modifizierten Mäanderbahn eine gleichmäßige Aufheizung des Substrates erzielen und einen Spritzverlust durch Overspray minimieren. Hierbei verfährt die Pistole beim ersten Überlauf über die Bauteiloberfläche ein konventionelles Mäander. Beim zweiten Überlauf wird das Mäander um einen halben Bahnabstand versetzt und rückwärts durchlaufen [GKKW08].

Faschin et al. entwickelten eine Bahnstrategie um besonders gleichmäßige Schichtdicken zu erzielen. Bei dieser Strategie wird die Bauteiloberfläche mäanderförmig abgefahren und ein Bahnabstand von einer Standardabweichung eingestellt. Der erste Überlauf der Spritzpistole über die Bauteiloberfläche wird konventionell ausgeführt, wohingegen bei dem zweiten Überlauf der Spritzpistole der Startpunkt des Mänders um eine Standardabweichung versetzt wird. Der dritte Überlauf wird genau in der Mitte zwischen den ersten beiden Überläufen gestartet und der vierte Überlauf wird um eine Standardabweichung des dritten Überlaufs versetzt. So ergeben sich immer

bei dem $(2^n - 1)$ ten Überlauf Schichten mit einer gleichmäßigen Schichtdicke [FWP92]. Bei besonders komplexen Bauteilen ist eine Segmentierung der Bauteiloberfläche und die Beschichtung der einzelnen Segmente nacheinander häufig erforderlich, um eine gleichmäßige Schichtdicke auf der gesamten Bauteiloberfläche einzustellen. Kritisch sind hierbei nur die Übergänge zwischen den einzelnen Segmenten, wo teilweise Änderungen der Schichtdicke beobachtet werden [CX08].

2.5.7 Fazit

Die Beschichtung komplexer Bauteile wird wesentlich durch die Bahnplanungsparameter Spritzwinkel, Spritzabstand, Bahnabstand und Verfahrensgeschwindigkeit sowie Randbedingungen bei der Beschichtung wie Bauteilkontur und Bahnstrategie beeinflusst. Es lassen sich aus der Literaturlauswertung folgende Rückschlüsse ziehen:

- Der Spritzwinkel beeinflusst die Beschichtungsqualität hauptsächlich bei Spritzwinkeln unterhalb von 60° . Dementsprechend sollte, wenn möglich, ein Spritzwinkel größer als 60° verwendet werden.
- Für jeden Beschichtungsprozess und Spritzzusatz gibt es genau einen idealen Spritzabstand. Ist bei der Beschichtung komplexer Oberflächen eine Veränderung des Spritzabstands unvermeidbar, so sollte er nur minimal variiert werden.
- Der Bahnabstand sollte kleiner als eine Standardabweichung des Spritzprofils gewählt werden, um eine starke Welligkeit der Schichtoberfläche zu vermeiden. Bei sehr geringen Bahnabständen muss die Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzpistole erhöht werden.
- Die Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzpistole sollte einen Minimalwert nicht unterschreiten, um eine starke thermische Belastung des Bauteils zu verhindern. Bei sehr hohen Verfahrensgeschwindigkeiten muss das Bauteil geheizt werden, um eine Abkühlung zu vermeiden.
- Bauteile sollten schon bei der Konstruktion beschichtungsgerecht ausgelegt werden, um möglichen Problemstellen bei der Beschichtung entgegenzuwirken. Besonders rechtwinkelige Ecken und Nuten sind zu vermeiden.
- Die Bahnplanung muss die Dynamik des Beschichtungsroboters berücksichtigen. Die richtige Wahl der Position des Roboters und der Achsen mit denen die Bahngeschwindigkeit bereitgestellt wird, ist entscheidend für eine gute Schichtqualität.

Kapitel 3

Schlussfolgerung und Zielsetzung

Die Auswertung der Fachliteratur zeigt, dass das Thermische Spritzen eine wichtige und vielfältig einsetzbare Technologie zur Veredelung von Bauteiloberflächen ist, die sich seit ihrer Einführung Anfang des 20ten Jahrhunderts stetig weiterentwickelt hat. Heute existieren eine Vielzahl an Thermischen Spritzverfahren, die auf die verschiedensten Anwendungsbereiche angepasst sind. Zudem wächst der Anteil der Thermischen Spritztechnik in dem Bereich der Oberflächentechnik stetig und dieser Trend wird bis in die Zukunft prognostiziert. Die Hauptursachen für die steigende Beliebtheit der Thermischen Spritztechnik sind die hohe Flexibilität und Automatisierbarkeit des Thermischen Spritzprozesses, gekoppelt mit der fast unbeschränkten Anzahl an Spritzzusätzen und Substratwerkstoffen, die eingesetzt werden können.

Zur Herstellung von thermischen Spritzschichten mit einer hohen Qualität und anwendungsangepassten Schichteigenschaften ist eine Optimierung der Prozessparameter notwendig. Der klassische Ansatz hierbei ist die Variation und Untersuchung eines einzelnen Spritzparameters bei Konstanthaltung aller anderen Parameter im Spritzprozess. Dies wird für alle relevanten Prozessparameter unabhängig voneinander durchgeführt und anschließend wird auf Grundlage der Einzelergebnisse ein globales Optimum definiert. Die große Popularität dieser Vorgehensweise liegt darin begründet, dass komplizierte Zusammenhänge auf ein eindimensionales Problem reduziert werden können. Jedoch werden bei dieser Methode komplexe Wechselwirkungen zwischen Prozessparametern nur mit einem großen experimentellen Aufwand erfasst. In jüngster Zeit werden daher vermehrt statistische Versuchsplanungsmethoden zur Optimierung von thermischen Spritzschichten genutzt. Mit diesen Methoden können alle relevanten Effekte inklusive wechselwirkende Prozessparameter unabhängig voneinander geschätzt werden. Allerdings müssen bei dem Einsatz statistischer Versuchsplanungsmethoden die Grenzen des Versuchsplans mit einem gewissen Vorwis-

sen gewählt werden, da ansonsten keine optimalen Ergebnisse erhalten werden. Dies ist besonders bei neuen Schichtsystemen häufig nur schwierig realisierbar.

Die Beschichtung komplexer Bauteilgeometrien nimmt zunehmend einen höheren Stellenwert in der Thermischen Spritztechnik ein, da neben den konventionellen großflächigen, ebenen oder rotationssymmetrischen Bauteilen, heutzutage vermehrt geometrisch komplexe oder sogar freigeformte Bauteile beschichtet werden. Bei der Beschichtung derartiger Bauteile hat die Bahnplanung einen sehr großen Einfluss auf das Beschichtungsergebnis. Die Bahnplanung zur Beschichtung eines komplexen Bauteils kann allerdings nur dann sinnvoll durchgeführt werden, wenn die Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Bauteile bekannt sind und deren Einfluss auf das Beschichtungsergebnis kontrolliert werden kann.

In der Fachliteratur finden sich einige Veröffentlichungen, in denen die Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Oberflächen untersucht wurden. Im Rahmen dieser Studien wurde ermittelt, dass die Hauptparameter bei der Beschichtung komplexer Oberflächen der Spritzwinkel, der Spritzabstand, der Bahnabstand und die Verfahrensgeschwindigkeit sind. Zudem müssen bei der Bahnplanung die Geometrie des Bauteils und die Dynamik des Beschichtungsroboters berücksichtigt werden. Der Großteil der Veröffentlichungen befasst sich inhaltlich allerdings nur mit der phänomenologischen Untersuchung der einzelnen Einflussgrößen. Umfassende Untersuchungen der Zusammenhänge und wichtige Rückschlüsse aus den Untersuchungen für die Bahnplanung werden zumeist nicht gezogen. Auch lässt sich in der Fachliteratur nur eine geringe Anzahl an Veröffentlichungen finden, in denen deterministische Vorgehensweisen und bahnplanerische Aspekte zur Beschichtung komplexer Bauteile vorgestellt werden. In den meisten Fällen werden aufwendige Anpassungen der Spritzbahnen an die Bauteilkontur, auf der Grundlage von Trial-and-Error Prozessen, durchgeführt. Diese Vorgehensweise ist allerdings wirtschaftlich nicht vertretbar, da bis zu der Findung der idealen Spritzbahn sehr viele Optimierungszyklen durchlaufen werden müssen, welche zum Teil mehrere Monate oder sogar Jahre dauern können. Besonders in Hinblick auf die immer kürzeren Produktzyklen und die immer größere Produktvielfalt an thermisch gespritzten Bauteilen ist diese Vorgehensweise nicht vielversprechend.

Das Ziel dieser Dissertation ist die Erarbeitung eines umfassenden Konzeptes zur Herstellung von maßgenauen Verschleißschichten mit einer optimierten Schichtstruktur auf komplexen Bauteiloberflächen. Auf Grundlage der ermittelten Ergebnisse soll eine systematische Bahnplanung ermöglicht werden, so dass auch komplexe Bauteile mit einer geringen Anzahl an Bahnplanungsoptimierungszyklen konturgenau

beschichtet werden können. Die Hauptschwerpunkte der Untersuchungen bilden die Herausarbeitung von relevanten Einflussgrößen zur Beschichtung komplexer Bauteile sowie die Bestimmung von Parameterfeldern, in denen die ermittelten Einflussgrößen gezielt genutzt werden können, um gleichmäßige Schichtdicken und -qualitäten auf komplexen Oberflächen zu erzielen. Zudem sollen verfahrensspezifische Eigenheiten der Thermischen Spritzprozesse Atmosphärisches Plasmaspritzen und Lichtbogenspritzen sowie grundsätzliche Unterschiede zwischen den Spritzverfahren bei der Beschichtung komplexer Oberflächen aufgezeigt werden.

Kapitel 4

Experimentelles

4.1 Erklärung der Vorgehensweise

Zur Erreichung der Ziele wurden in dieser Dissertation experimentelle Versuchsreihen mit dem Atmosphärischen Plasmaspritzprozess und dem Lichtbogenspritzprozess durchgeführt. Als Spritzzusätze wurden dabei Werkstoffe mit einer Kobalt- oder Eisenbasismatrix und Wolframkarbid als verschleißhemmendem Hartstoff eingesetzt. Derartige Schichtsysteme stellen derzeit eine der wichtigsten Werkstoffgruppen für den Verschleißschutz dar, da sie die hohe Härte und Verschleißfestigkeit des Wolframkarbids mit der Zähigkeit und Duktilität der metallischen Matrix kombinieren. Somit lassen sich Schichten erzeugen, die einen hohen Schutz gegen Erosion, Abrasion, Reibverschleiß und schlagende Beanspruchungen aufweisen und daher industriell vielfältig einsetzbar sind [VL98, STM01]. Im Atmosphärischen Plasmaspritzprozess wurde das Schichtsystem WC-12Co und im Lichtbogenspritzprozess das Schichtsystem WSC-Fe eingesetzt (vgl. Kapitel 4.3).

Beide Schichtsysteme wurden unter Einsatz von Prozessparameterstudien optimiert. Das Ziel hierbei war die Herstellung von Spritzschichten mit einer dichten und homogenen Morphologie, einer glatten Topographie, einer hohen Adhäsion und Kohäsion im Schichtverbund sowie einem geringen Abbrand der Karbide. Das atmosphärisch plasmagespritzte Schichtsystem WC-12Co wurde unter Einsatz von statistischen Versuchsplanungsmethoden optimiert, während das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe mit einem klassischen Versuchsplan angepasst wurde (vgl. Kapitel 4.5.1). Bei der klassischen Versuchsplanung wird nur ein Prozessparameter unter Konstanthaltung aller anderen Prozessparameter variiert und der Einfluss dieses Parameters auf die Eigenschaften der Beschichtung untersucht. Diese Vorgehensweise liefert beson-

ders dann gute Ergebnisse, wenn unbekannte Zusammenhänge untersucht werden. Sie wurde daher zur Optimierung des recht neuen und in der Fachliteratur nur unzureichend untersuchten Schichtsystems WSC-Fe gewählt. Die statistische Versuchsplanung eignet sich dagegen besser, um globale Optima zu finden und wechselseitige Effekte zu untersuchen. Allerdings kann eine statistische Versuchsplanung nur dann zielführend eingesetzt werden, wenn durch entsprechende Vorarbeiten ein gewisses Vorwissen vorhanden ist. Dies ist für das plasmagespritzte Schichtsystem WC-12Co gegeben, da Wolframkarbidkobalt seit vielen Jahren in der Thermischen Spritztechnik eingesetzt wird.

Nach erfolgreicher Optimierung der Prozessparameter beider Schichtsysteme wurden die Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Bauteile ermittelt (vgl. Kapitel 4.5.2). Hierzu wurde der Einfluss der Parameter Spritzwinkel, Spritzabstand, Bahnabstand und Verfahrensgeschwindigkeit auf die Eigenschaften der Beschichtung untersucht und anschließend diskutiert. Zudem wurden empirische Modelle zur Vorhersage von Schichtdicken bei der Variation einer der Einflussgrößen aufgestellt und anhand einer Kombination der Einflussgrößen, die Möglichkeit zur Erzielung gleichmäßiger Schichtdicken überprüft. Außerdem wurde der Einfluss der Bauteilgeometrie und der Bahnstrategie auf das Beschichtungsergebnis untersucht. Das Ziel der Untersuchungen war die Erarbeitung grundsätzlicher Zusammenhänge zwischen den Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Oberflächen und den Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten, sowie die Kontrolle der Einflussgrößen für eine gezielte Manipulation der Schichtdicke und -qualität. Auch sollten verfahrensabhängige Unterschiede zwischen dem atmosphärischen Plasmaspritzen und dem Lichtbogenspritzen bei der Beschichtung komplexer Bauteile herausgestellt werden.

Anschließend wurden einige Fallstudien durchgeführt, in denen die im Vorhinein untersuchten Einflussgrößen gezielt genutzt wurden, um gleichmäßige Schichtdicken auf verschiedenen komplexen Bauteilen zu erzeugen (vgl. Kapitel 4.5.3). Hierbei wurden verschiedene regelgeometrische Bauteile und Segmente eines Umformwerkzeuges mit dem Lichtbogenspritzprozess beschichtet. In Abbildung 4.1 ist die Vorgehensweise der experimentellen Arbeiten schematisch dargestellt.

Vorgehensweise

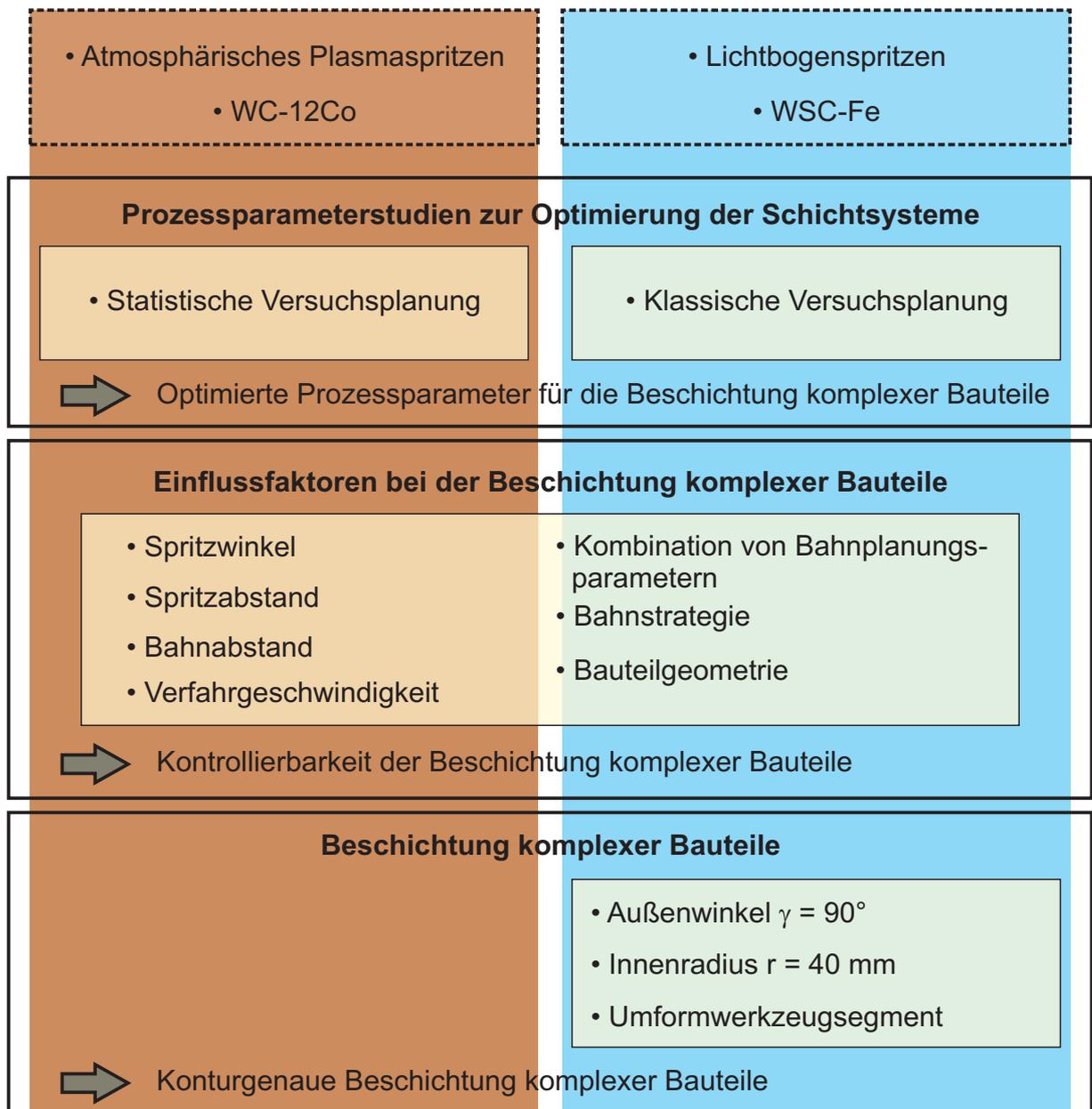


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des experimentellen Versuchsplans

4.2 Thermisches Spritzen

4.2.1 Grundwerkstoff

Als Grundwerkstoff wurden in allen Beschichtungsversuchen vergütete C45-Stahlsubstrate (1.0503) in unterschiedlichen Abmessungen eingesetzt. Die chemische Zusammensetzung der Stahlsubstrate ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0,42-0,50	≤0,40	0,50-0,80	≤0,045	≤0,045	≤0,40	≤0,10	≤0,40	Rest

Tabelle 4.1: Chemische Zusammensetzung C45-Stahl

4.2.2 Probenvorbereitung

Die Stahlsubstrate wurden zur Vorbereitung auf einen Thermischen Spritzversuch durch Sandstrahlen mit spratzigem Edelkorund aufgeraut. In Abhängigkeit des verwendeten Spritzprozesses wurden unterschiedliche Kornfraktionen des Edelkorunds verwendet (Tabelle 4.2). Die Aufrauung der Substratoberfläche geschah unter einem Winkel von 45°, bei einem Abstand von 100 mm und mit einem Strahldruck von 4 bar. Anschließend wurden die Proben für 15 min in einem Ultraschallbad mit Ethanol gereinigt und in einem Umluftofen auf ca. 120°C erwärmt. Diese Prozedur ermöglicht eine Verringerung der thermischen Eigenspannungen im Spritzprozess.

Spritzverfahren	Klasse	Korngröße [µm]
Atmosphärisches Plasmaspritzen	EKF-24	600-850
Lichtbogenspritzen	EKF-14	1180-1700

Tabelle 4.2: Eingesetzte Edelkorund-Kornfraktionen zur Aufrauung der Probenoberfläche

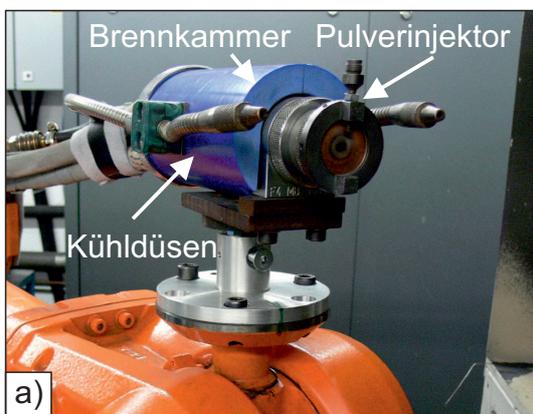
4.2.3 Verfahrkinematik

Die Schichtoptimierungsversuche wurden mit einer Fünf-Achs-Linearverfahreinheit der Fa. GTV mbH, Modell GTV 8800 durchgeführt. Zur Untersuchung der Einflussgrößen bei der Beschichtung komplexer Oberflächen und zur Beschichtung komplexer Bauteile wurde ein Sechs-Achs-Industrieroboter der Firma ABB, Modell IRB 4600 mit einem Handhabungsgewicht von 60 kg eingesetzt.

4.2.4 Thermische Spritzverfahren

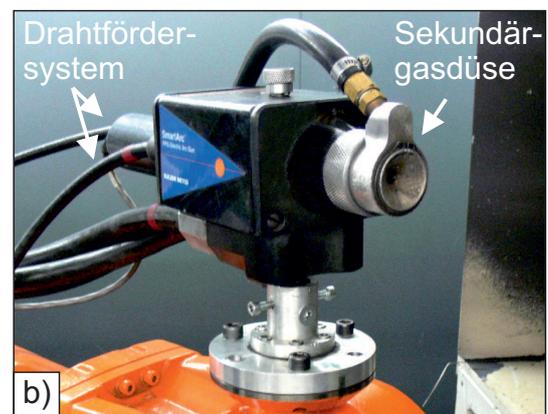
Zur Herstellung von WC-12Co Spritzschichten wurde ein DC Plasmabrenner der Firma Sulzer Metco, Modell F4-MB mit den Betriebsgasen Argon und Wasserstoff und ein TWIN 120 AH Pulverförderer eingesetzt. WSC-Fe Fülldrähte wurden mit einem Lichtbogenbrenner der Firma Sulzer Metco, Modell Smart Arc PPG verspritzt. In Abbildung 4.2 sind die technischen Details beider Brenner dargestellt.

**DC Plasmabrenner
Sulzer Metco F4-MB**



Betriebsspannung: 3x380 V/ 50 Hz
Leistungsbereich: 40-55 kW
Kühlmedium: entionisiertes Wasser
Gase:
- Ar: 2-100 l/min
- H₂: 0,4-20 l/min
- He: 4-200 l/min
- N₂: 2-50 l/min

**Lichtbogenbrenner
Sulzer Metco Smart Arc PPG**



Betriebsspannung: 10-46 V
Betriebsstrom: 80-400 A
Primärgas: 2-6 bar
Sekundärgas: 0-6 bar
Drahtförderung: Push-and-Pull
Drahtdurchmesser: 1,6 mm

Abbildung 4.2: Technische Daten des a) DC Plasmabrenners Sulzer Metco F4-MB und b) des Lichtbogenbrenners Sulzer Metco Smart Arc

4.3 Spritzzusätze

4.3.1 WC-12Co

Im Plasmaspritzprozess wurde ein kommerziell verfügbares, agglomeriert und gesintertes WC-12Co Pulver der Firma Sulzer Metco, Deutschland (72F-NS) untersucht. Das Pulver weist eine sphärische Partikelform auf. Ein Pulverpartikel besteht aus 1-3 μm großen Karbiden, welche in eine Kobalt Matrix eingebettet sind (Abbildung 4.3).

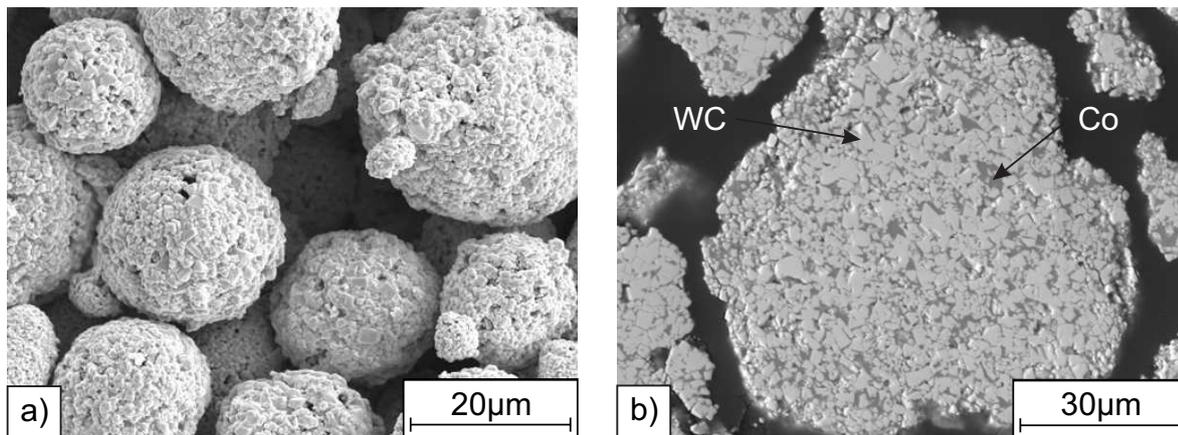


Abbildung 4.3: REM Aufnahmen des agglomeriert und gesinterten WC-12Co Pulvers, a) Übersicht, b) Querschliff durch ein Pulverkorn

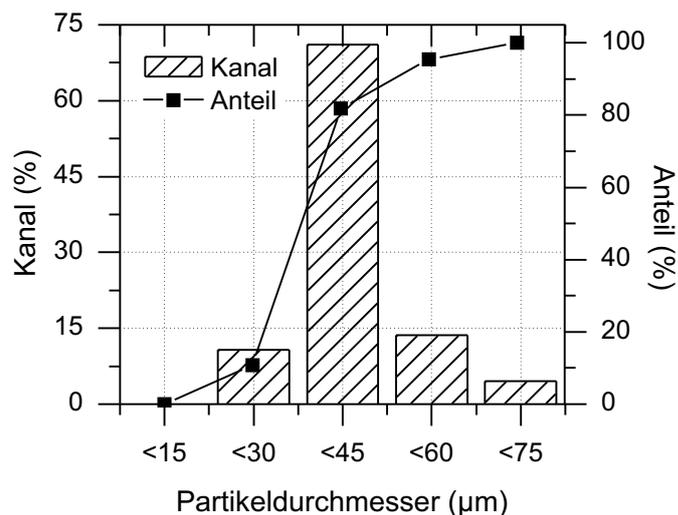


Abbildung 4.4: Partikeldurchmesserverteilung des WC-12Co Pulvers

Laut Hersteller wird eine Partikelgrößenverteilung von 15 μm bis 45 μm angegeben. Unter Verwendung von Lichtstreuungsmessungen nach Fraunhofer und Mie (Fa. Microtrac, Modell S3500) wurde eine Partikeldurchmesserverteilung von 22 μm bis 52 μm ,

mit einem Modalwert bei 36 μm , ermittelt. In Abbildung 4.4 ist die Partikeldurchmesser-
serverteilung des Pulvers dargestellt. Die chemische Zusammensetzung des Pulvers
wurde mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektroskopie (ICP-MS) (Co, Fe,
Ni, Cr), der Differenz Methode (W) und mittels Gravimetrie (C) gemessen und ist in
Tabelle 4.3 aufgelistet¹. Das Pulver hat annähernd die ideale Zusammensetzung von
88 m.-% WC und 12 m.-% Co. Lediglich geringe Verunreinigungen mit Eisen, verur-
sacht durch den Herstellungsprozess, können detektiert werden.

C	Co	Fe	W	andere
5,30	12,40	0,12	81,84	0,34

Tabelle 4.3: Chemische Zusammensetzung des verwendeten WC-12Co Pulvers in m.-%

¹Die chemischen Analysen wurden bei der Fa. Sulzer Metco, Deutschland durchgeführt.

4.3.2 WSC-Fe

In dem Lichtbogenspritzprozess wurde ein gefalzter, hartstoffhaltiger Fülldraht auf Fe-Basis der Firma Durum Verschleißschutz GmbH, Deutschland (Durmat AS-850) eingesetzt (Abbildung 4.6). Die äußere Hülle des Drahtes besteht aus einer Fe-Basis-Legierung, gefüllt mit Wolframschmelzkarbiden (WSC). Die Größe der Wolframschmelzkarbide wird laut Hersteller mit 45 - 106 μm und einem Modalwert bei 74 μm angegeben. Dies kann durch Lichtstreuungsmessungen nach Fraunhofer und Mie (Fa. Microtrac, Modell S3500) bestätigt werden. Die gemessene Partikelgrößenverteilung ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Für den Einsatz im thermischen Spritzprozess wurde der Draht mit einem Durchmesser von 1,6 mm gefertigt.

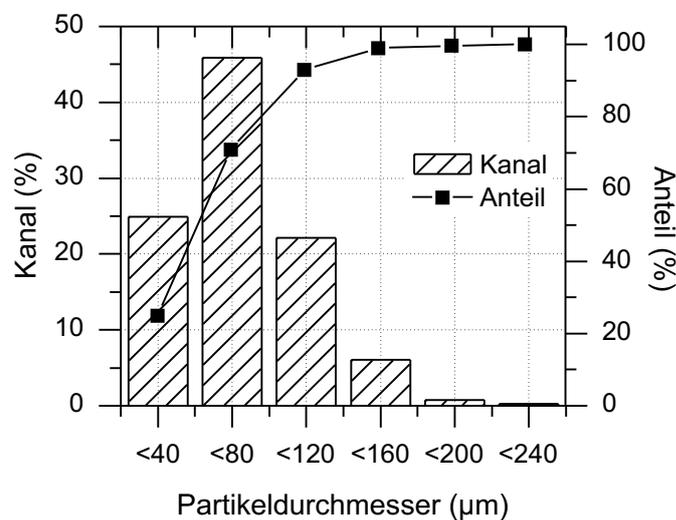


Abbildung 4.5: Partikeldurchmesserverteilung der Karbidfüllung im WSC-Fe Spritzdraht

Abbildung 4.6b zeigt die gebrochene, scharfkantige Struktur der Wolframschmelzkarbide. In den Karbiden lässt sich die charakteristische Federstruktur der in WC eingelagerten W_2C -Kristallite erkennen. Laut Herstellerangabe weisen die WSC Karbide eine Härte von $>2300 HV_{0,1}$ auf. Die Härte des Fe-Basis Mantels wurde gemessen und beträgt etwa $165 HV_{0,1}$. Mit dem WSC-Fe Fülldraht lassen sich Spritzschichten mit einer Härte bis zu 60 HRC bzw. 700 HV herstellen [Dur05]. Der Anteil von WSC macht 50 m.-% der Fülldrahtlegierung aus und begünstigt die Herstellung verschleißbeständiger Spritzschichten. Die vollständige chemische Zusammensetzung des eingesetzten Fülldrahtes ist der Tabelle 4.4 zu entnehmen².

²Die chemische Zusammensetzung des Drahtes wurde bei der Fa. Durum Verschleißschutz GmbH gemessen.

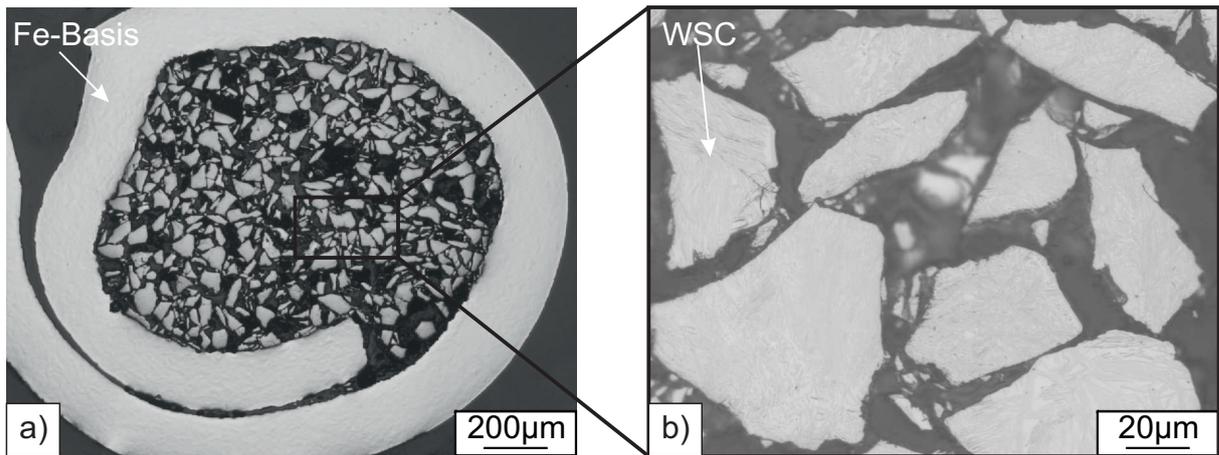


Abbildung 4.6: Lichtmikroskopische Aufnahmen eines WSC-Fe Fülldrahtes, a) Übersichtsaufnahme, b) Detailaufnahme der WSC Füllung

Cr	Mn	Si	C	WSC	Fe
4	<1	1,4	2	50	Rest

Tabelle 4.4: Chemische Zusammensetzung des WSC-Fe Fülldrahtes

4.4 Untersuchungsmethoden

4.4.1 Lichtmikroskopie

Die thermisch gespritzten Proben wurden getrennt und metallographisch präpariert. Anschließend wurden die präparierten Schiffe lichtmikroskopisch unter Einsatz eines Lichtmikroskops der Firma Zeiss, Modell Axiophot untersucht. Anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen wurden mittels digitaler Bildanalyse (Fa. Zeiss, Axiovision 4.6) die Dicke und die Porosität der Beschichtungen ermittelt. Die Schichtdickenmessung wurde konform zu der DIN EN ISO 1463 durchgeführt. Die Porositätsmessung wurde anhand einer Grauwertdifferenzierung an Schwarz-Weiß-Aufnahmen (200fache Vergrößerung) der Schiffe vorgenommen. Bei der Grauwertdifferenzierung wird ein Schwellwert vorausgewählt. Alle Bereiche des Schliffs, die den Schwellwert unterschreiten, werden als Poren gewertet. Zur Ermittlung einer repräsentativen Porosität wurde die Grauwertdifferenzierung an jeder Probe zehn mal durchgeführt und es wurde der Mittelwert inklusive der Standardabweichung der Messungen berechnet.

4.4.2 Rasterelektronenmikroskopie

Ausgewählte Proben wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop der Firma Jeol, Modell JXA-840 untersucht. Dieses Gerät ist ausgestattet mit einem Sekundärelektronendetektor zur Darstellung des Topographiekontrasts und einem Rückstreuelektronendetektor zur Darstellung des Materialkontrasts. Zur Ermittlung des Anteils an geschmolzenen Karbiden im WC-12Co Schichtgefüge wurden jeweils zehn Aufnahmen der Schiffe bei einer 3000fachen Vergrößerung gemacht und diese bildanalytisch mit der Software JMicoVision v1.2.7 ausgewertet. Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft die Bestimmung des Anteils an geschmolzenen Karbiden. In einem Rückstreubild werden die Bereiche markiert, die ein stark umgeschmolzenes Schichtgefüge aufweisen. Danach werden die Flächeninhalte der markierten Bereiche mit dem gesamten Flächeninhalt des Rückstreubildes mit der folgenden Formel in Beziehung gesetzt:

$$\text{Anteil geschmolzener Karbide [\%]} = \frac{A_{\text{geschmolzene Karbide}}}{A_{\text{gesamt}}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Hierbei ist $A_{\text{geschmolzene Karbide}} [mm^2]$ der Flächeninhalt der Bereiche mit stark umgeschmolzenen Karbiden und $A_{\text{gesamt}} [mm^2]$ entspricht der gesamten Fläche der Aufnahme.

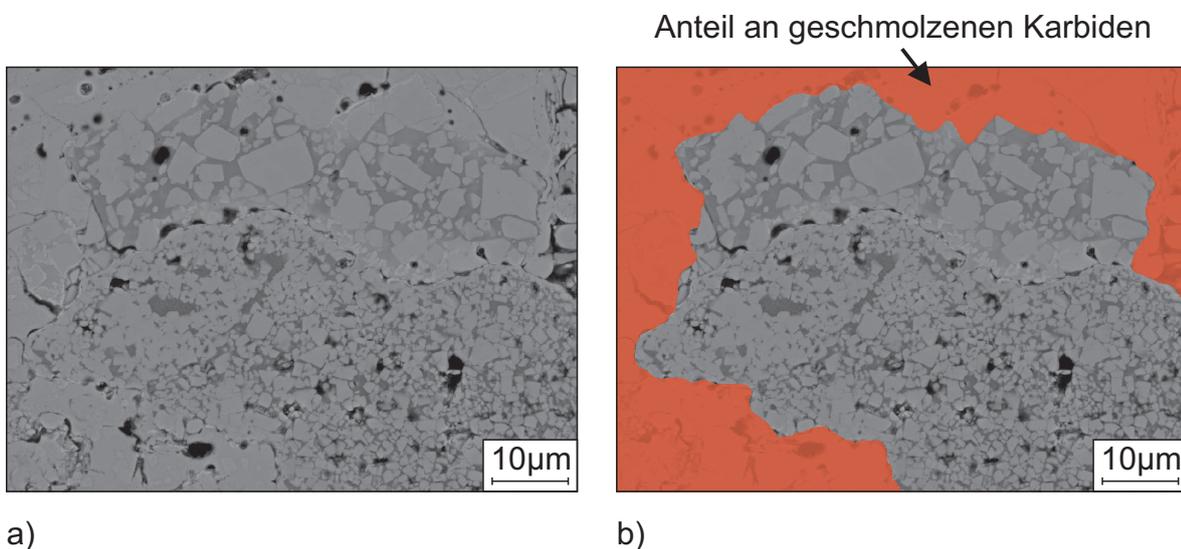


Abbildung 4.7: Ermittlung des Anteils an geschmolzenen Karbiden im WC-12Co Schichtgefüge mittels Rasterelektronenmikroskopie. a) Rückstreubild, b) markierter Anteil an geschmolzenen Karbiden

4.4.3 Rauheitsmessung

Die Rauheit der Spritzschichten wurde mit einem taktilen Rauheitsmessgerät der Firma Hommel, Modell T-1000 und dem Tastertyp TK300 ermittelt. Die Rauheitsmessungen wurden konform zu der DIN 4760 mit einer Taststrecke von 4,8 mm und einer Grenzwellenlänge von $l_c = 0,8 \text{ mm}$ durchgeführt. An jeder Probe wurde die mittlere Rauheit anhand des Mittelwerts und der Standardabweichung von fünf Einzelmessungen bestimmt.

Die Beurteilung der Thermischen Spritzschichten bezüglich ihrer Rauheit erfolgt in dieser Arbeit mit der gemittelten Rautiefe R_z . Diese ist definiert als der Mittelwert aus Einzelrautiefen $R_{z,i}$, fünf aufeinander folgender Einzelmessstrecken im Rauheitsprofil:

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \sum_{i=1}^5 R_{z,i} \quad (4.2)$$

Dabei ist die Einzelrautiefe $R_{z,i}$ die größte Höhe des Profils und setzt sich aus der größten Profilspitze R_p und der Tiefe des größten Profiltals R_v zusammen:

$$R_{z,i} = R_p + R_v \quad (4.3)$$

4.4.4 Härtebestimmung

Die Härteprüfung der Thermischen Spritzschichten erfolgte an metallographisch präparierten Schlifflinien mit einem Mikrohärteprüfgerät der Firma Leco, Modell M-400. Es wurde die Vickershärte nach DIN EN ISO 6507 gemessen, bei deren Ermittlung eine Diamantpyramide mit quadratischer Grundfläche und einem Flächenwinkel von 136° mit einer bestimmten Prüfkraft und -zeit in die Schicht gedrückt wird und anschließend die Diagonalen d_1 und d_2 des Abdrucks ausgewertet werden. Die Vickershärte ist definiert als:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{F}{A} = 0,102 \cdot \frac{F \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} \approx 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4.4)$$

Hierbei ist A [mm²] die Eindruckoberfläche, d [mm] der Mittelwert aus den zwei gemessenen Diagonalen d_1 und d_2 und F [N] die Prüfkraft. In dieser Arbeit wurden die Mikrohärte $HV_{0,1}$ sowie die Kleinlasthärten $HV_{0,3}$ und $HV_{0,5}$ ermittelt. Ein Eindruck erfolgte mit einer Prüfzeit von 15 s.

4.4.5 Optische 3D-Profilometrie

Die Topographie der Spritzprofile bei verschiedenen Spritzwinkeln wurde mit einem optischen 3D-Profilometer der Firma Alicona, Modell Infinite Focus ermittelt. Dazu wurden mit einem 2,5x Objektiv mehrere parallele Einzelbilder aufgenommen und diese anschließend zu einer Bilderfolge zusammengesetzt. Das Höhenprofil des Spritzprofils wurde dann durch einen Profilschnitt durch die Bilderfolge bestimmt.

Mit dem optischen 3D-Profilometer (10x Objektiv) wurde ebenfalls die Rauheit der lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten in ihrer Optimierungsphase (Kapitel 5.2) gemessen. Besonders bei nicht optimierten Spritzparametern weisen diese Schichten eine sehr hohe Rauheit auf, die sich taktil nicht mehr fehlerfrei erfassen lässt. Die optische Messung der Schichtrauheit ist allerdings nicht standardisiert. Sie kann zwar konform zu der DIN EN ISO 4287/ 4288 durchgeführt werden [Ali10]. Erfahrungsgemäß werden aber höhere Rauheitswerte als bei einer taktilen Rauheitsmessung ermittelt. Somit ist ein direkter Vergleich zwischen den Ergebnissen der optischen Messungen und den Ergebnissen der taktilen Messungen nicht durchführbar.

4.4.6 Röntgendiffraktometrie

Die Phasenzusammensetzung ausgewählter Thermischer Spritzschichten wurde mit einem Röntgendiffraktometer der Firma Bruker AXS, Modell D8 Advance ermittelt. Die Messung erfolgte mit $Cu K\alpha$ -Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 0,154 \text{ nm}$. Die Identifikation der Phasen geschah durch einen Vergleich der experimentellen Reflexlagen mit den theoretischen Werten der Datenbank.

4.4.7 Haftzugprüfung

Die Ermittlung der Haftzugfestigkeit der Thermischen Spritzschichten erfolgte im Stirnzugversuch nach DIN EN 582. Dazu wurden zylindrische Stahlsubstrate ($\varnothing = 40 \text{ mm}$) auf ihrer Stirnfläche beschichtet und anschließend axial mit einem Stempel verklebt. Die nominelle Festigkeit des Klebers wird mit 100 MPa angegeben. Der Zugversuch wurde mit einer Universalprüfmaschine der Firma Mohr & Federhoff mit einer maximalen Zugkraft von 100 kN durchgeführt. Die maximale meßbare Haftzugfestigkeit an den verwendeten Stahlsubstraten ist daher 79,6 MPa.

4.4.8 Spannungsmessung

Der Eigenspannungszustand der Thermischen Spritzschichten wurde nach der inkrementellen Bohrlochmethode (ASTM E837) mit einer Prüfmaschine der Firma Measurements Group, Modell RS-200 Milling Guide ermittelt. Bei der inkrementellen Bohrlochmethode wird eine speziell konfigurierte Dehnungsmessstreifen (DMS)-Rosette auf die Oberfläche der Beschichtung geklebt und ein dünnes Loch mittig in diese gebohrt. Die DMS-Rosette detektiert dabei die lokale Dehnung der Beschichtung. Unter Angabe des Elastizitätsmoduls und der Poissonzahl kann die lokale Dehnung der Beschichtung in die Eigenspannung der Beschichtung umgerechnet werden. Genauere Details zu der Vorgehensweise können in [MM10] nachgelesen werden.

Bei der Ermittlung der Eigenspannungen der WC-12Co Schichten wurde näherungsweise ein Elastizitätsmodul von $E = 210 \text{ GPa}$ und eine Poissonzahl von $\mu = 0,30$ angenommen. Die Eigenspannungen wurden dabei über den gesamten Schichtverlauf mit einer Tiefenauflösung von $10 \mu\text{m}$ gemessen. Die Auswertung erfolgte mittig in der Beschichtung in einer Tiefe von $200 \mu\text{m}$ von der Oberfläche.

4.4.9 Partikeltemperatur- und geschwindigkeit

Die Eigenschaften der Spritzpartikel in der Flugphase wurden mit einem Partikeldiagnostiksystem der Firma Teknar, Modell Accuraspray gemessen. Die Ermittlung der Partikelgeschwindigkeit geschieht dabei durch Kreuzkorrelation von zwei Messsignalen in einem bekannten Abstand. Die Partikeltemperatur wird über ein Zwei-Farben-Pyrometer bestimmt. Bei der Zwei-Farben-Pyrometrie wird die Wärmestrahlung eines heißen Objektes bei zwei verschiedenen Wellenlängen gemessen. Durch Bildung eines Quotienten der Strahlungsintensitäten lässt sich daraus die Temperatur berechnen. Der Vorteil dieses Verfahrens gegenüber der Ein-Farben-Pyrometrie liegt darin, dass das Messergebnis unabhängig von dem Emissionsgrad des strahlenden Körpers ist und daher ohne eine Kalibration des Messinstruments für beliebige Körper genutzt werden kann.

4.5 Versuchsprogramm

4.5.1 Prozessparameterstudien

4.5.1.1 Statistische Versuchsplanung (WC-12Co)

Zur Optimierung der Prozessparameter für die Herstellung von plasmagespritzten WC-12Co Schichten wurden statistische Versuchsplanungsmethoden verwendet. In dieser Arbeit wurde ein Central Composite Design (Zentral-zusammengesetzter Plan) gewählt [Kle08]. Das Central Composite Design zeichnet sich dadurch aus, dass mit ihm sowohl lineare, als auch quadratische Effekte sowie Wechselwirkungen zwischen linearen, quadratischen und wechselseitige Effekte untersucht werden können. Dabei bleibt der experimentelle Aufwand verhältnismäßig gering. Weltweit ist das Central Composite Design einer der beliebtesten Versuchsplänen zur Untersuchung quadratischer Zusammenhänge [PKC08]. Ein Central Composite Design besteht aus folgenden Teilen:

- **Kubuspunkte**, d.h. einem 2^n vollfaktoriellen oder einem 2^{n-p} teilfaktoriellen Versuchsplan (n: Anzahl der Prozessparameter, p: Anzahl der Fraktionen) (vgl. [Kle08])
- **Achspunkte**, d.h. $2n$ Endpunkte eines Sterns mit Achsenpunkten im Abstand $\frac{b_i}{a_i}$ von 0. Bei $\frac{b_i}{a_i} < 1$ spricht man von inscribed Plänen, bei $\frac{b_i}{a_i} > 1$ von exscribed Plänen (vgl. Screening Design [Kle08]).
- **Zentrumspunkte**, d.h. Punkte im Zentrum des Designs zur Abschätzung des Fehlers (vgl. Nominal Design [Kle08])

Eine graphische Veranschaulichung eines dreidimensionalen Central Composite Designs ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Die Axialpunkte liegen hierbei auf einem Hyperkubus mit dem Radius b_i und es gilt $\frac{b_i}{a_i} > 1$, d.h. es handelt sich um ein exscribed Central Composite Design. Aufgespannt wird der Würfel durch die Kubuspunkte mit der Seitenlänge $2b_i$. An der Position $(0,0,0)$ befindet sich der Zentrumspunkt.

Bei dem in dieser Arbeit eingesetzten exscribed Central Composite Design wurden die Plasmaprozessparameter Verhältnis Ar/H_2 , Gasdurchsatz, Pulverförderrate und Spritzabstand untersucht.

Die Grenzen des Central Composite Designs wurden durch stichprobenartige Parametervariationen ermittelt. Als Kubuspunkte wurden die Werte $Ar/H_2 = 8, 10$, Gasdurchsatz [l/min] = 62, 82, Pulverförderrate [g/min] = 27, 47 und Spritzabstand [mm]

= 110, 150, als Achspunkte die Werte $Ar/H_2 = 7, 11$, Gasdurchsatz [l/min] = 52, 92, Pulverfördertrate [g/min] = 17, 57 und Spritzabstand [mm] = 90, 170 und sechs Zentrumspunkte mit $Ar/H_2 = 9$, Gasdurchsatz [l/min] = 72, Pulverfördertrate [g/min] = 37 und Spritzabstand [mm] = 130 gewählt. In Übereinstimmung mit verschiedenen Literaturquellen [FCV⁺87, VVF93, JMV⁺99, BBBV00, VVZ⁺02, RYNB03, GMC04, Ber04] ist bei diesen Prozessparametern in den gewählten Grenzen ein maximaler Einfluss auf das Beschichtungsergebnis zu erwarten. Eine detaillierte Auflistung der Versuchsparameter ist im Anhang dargestellt. Bei der Durchführung der Versuche wurden die Prozessparameter Strom [A] = 550, Verfahrgeschwindigkeit [mm/min] = 30000, Bahnabstand [mm] = 5 und Überläufe = 20 konstant gehalten.

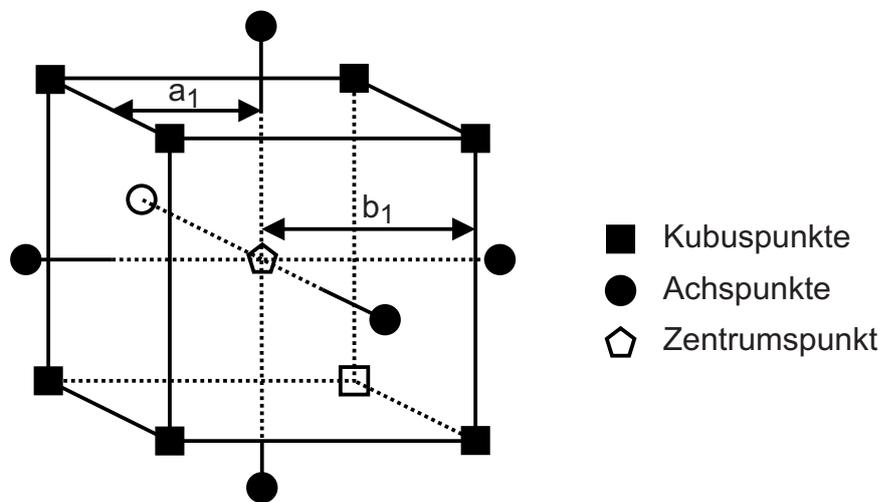


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung eines exscribed Central Composite Designs mit drei Prozessparametern

Die Auswertung der Ergebnisse der statistischen Versuchplanung geschah anhand von Pareto Diagrammen. Pareto Diagramme sind Balkendiagramme, in denen die einzelnen Werte der Signifikanz nach geordnet wiedergegeben werden. Dabei befindet sich der relevanteste Wert ganz oben im Diagramm und der irrelevanteste Wert ganz unten im Diagramm. Bei der in dieser Arbeit verwendeten speziellen Form eines Pareto Diagramms werden die Effekte der Prozessparameter standardisiert, rechts neben jedem Balken, dargestellt. Ein positiver Effekt deutet darauf hin, dass eine Erhöhung des Prozessparameters zu einer Vergrößerung des Messwertes führt, wogegen ein negativer Wert umgekehrt eine Verkleinerung des Messwertes bei einer Vergrößerung des Prozessparameters bewirkt. Lineare Effekte sind gekennzeichnet durch (L), quadratische Effekte durch (Q), Wechselwirkungen durch (Effekt 1 by Effekt 2). Zusätzlich ist im Pareto Diagramm eine gestrichelte Linie mit $p = 0,05$ eingezeichnet. Diese Linie repräsentiert einen p-Wert von 5%. Der p-Wert ist das Ergebnis eines statistischen Si-

gnifikanztests [BL07], mit dem eine vorab aufgestellte Nullhypothese überprüft wird. Ist das Ergebnis des p-Tests kleiner als die gewählte Grenze, so wird die Nullhypothese abgelehnt, andernfalls wird sie angenommen. Zur Auswertung des Central Composite Designs wurde eine Grenze von $\alpha = 5\%$ gewählt. Die dabei aufgestellte Nullhypothese besagt, dass ein Prozessparameter keinen signifikanten Einfluss auf die Messgröße hat. Liegt der p-Wert unterhalb von 0,05, so wird diese Nullhypothese abgelehnt und der Prozessparameter wird als signifikant angesehen, andernfalls wird die Nullhypothese angenommen. Im Pareto Diagramm wird ein signifikanter Parameter laut des p-Tests durch eine Überlappung des Balken über die $p = 0,05$ Linie dargestellt.

Anhand der Meßwerte des Central Composite Designs wurde ein quadratisches Modell zur Vorhersage von Schichteigenschaften aufgestellt. Dazu wurden Verfahrenswesen der nichtlinearen Regression genutzt. Der generelle Ansatz für ein quadratisches Regressionsmodell ist gegeben durch :

$$y_i = \beta_0 + \sum_{l=1}^k \beta_l x_{il} + \sum_{m=1}^k \beta_{mm} x_{im}^2 + \sum_{r=1}^{k-1} \sum_{s=r+1}^k \beta_{rs} x_{ir} x_{is}, i = 1, \dots, n, \quad (4.5)$$

Wobei β_0, \dots, β_k die (zu schätzenden) Regressionskoeffizienten für die Prozessparameter x_i (Ar/H_2 , Gasdurchsatz, Pulverförderrate und Spritzabstand) sind [Wei07]. Die Anpassung des quadratischen Modells an die Messwerte wurde mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt [DV99]. Die Qualität des Modells wurde anschließend durch eine Gegenüberstellung der gemessenen und der, nach der quadratischen Regression erwarteten Werte, evaluiert. Dazu wurde eine lineare Regression mit

$$y = \beta_0 + \sum_{l=1}^k \beta_l x_l \quad (4.6)$$

durchgeführt und die Güte der Regression durch das Bestimmtheitsmaß

$$R_{xy}^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)(\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)}} \right)^2 \quad (4.7)$$

überprüft. Hierbei sind \bar{x} und \bar{y} jeweils die Mittelwerte der Messwerte. Das Bestimmtheitsmaß R_{xy}^2 liegt zwischen minus eins und eins. Bei einem Wert von eins besteht ein vollständig positiver linearer Zusammenhang, bei einem Wert von minus eins ein vollständig negativer linearer Zusammenhang zwischen x und y . Wenn das Bestimmtheitsmaß den Wert null aufweist, so hängen die Merkmale überhaupt nicht linear voneinander ab. Zwischen diesen Werten nimmt die Linearität in Richtung der Null ab.

Auf Grundlage des quadratischen Modells wurde anschließend eine Optimierung der Prozessparameter mit dem Konzept der Wünschbarkeiten durchgeführt [Ste05]. Bei dem Einsatz von Wünschbarkeiten wird der Vorhersage eines Messwertes durch die nichtlineare Regression ein Wert zwischen null und eins zugeordnet. So kann definiert werden in welchen Grenzen die Vorhersage eines Wertes akzeptabel ist und ab wann der Wert dem benötigten Qualitätsstandard nicht entspricht. In der Regel werden dafür in der Wünschbarkeitsfunktion drei Werte, einer am Anfang, einer in der Mitte und einer am Ende des Intervalls, angegeben. Dazwischen werden die Werte über die Rechenvorschrift der Wünschbarkeitsfunktion interpoliert [DV99]. Dies bietet die Möglichkeit, bei der Optimierung eines Parameters, nicht nur das absolute Maximum anzugeben, sondern auch zu definieren wie gut oder schlecht ein Zwischenwert für die Optimierung ist. Dies ist besonders interessant, wenn mehrere Parameter gleichzeitig optimiert werden. Durch das Konzept der Wünschbarkeiten kann vordefiniert werden, welcher Parameter besonders wichtig für die Optimierung ist und in welchen Grenzen ein Parameter als akzeptabel für das Ergebnis der Optimierung angesehen werden kann. Durch dieses Vorgehen kann ein globales Optimum aller Parameter erreicht werden. In dieser Arbeit wurden allen Parametern eine Wünschbarkeit von null an dem schlechtesten gemessenen Wert und eine Wünschbarkeit von eins an dem besten gemessenen Wert angegeben. Dazwischen steigt die Wünschbarkeitsfunktion linear an. Bei der Optimierung mit Wünschbarkeiten ist darüberhinaus zu beachten, dass je mehr Meßwerte in die Optimierung mit aufgenommen werden, desto schlechter ist das Ergebnis der Optimierung. Dieser Fall tritt besonders dann auf, wenn konträre Beziehungen gleichzeitig optimiert werden. Daher wurden bei der Optimierung nicht alle Meßwerte gleichzeitig optimiert, sondern es wurden selektiv nur besonders wichtige Parameter in die Optimierung mit aufgenommen. Mit den Ergebnissen der Optimierung wurden anschließend Schichten hergestellt und die vorhergesagten Werte am Optimum mit den tatsächlichen Werten der Schicht verglichen.

4.5.1.2 Klassische Versuchplanung (WSC-Fe)

Zur Optimierung der Prozessparameter des lichtbogengespritzten Schichtsystems WSC-Fe wurden Werkzeuge der klassischen Versuchplanung genutzt. Es wurde ein One-Factor-at-a-Time Versuchsplan eingesetzt, bei dem in einer Versuchsreihe der Einfluss eines Prozessparameters auf den jeweiligen Messwert überprüft wird. In dem Versuchsplan wurden die Prozessparameter Primärgasdruck, Sekundärgasdruck, Spannung und Strom, in den in Tabelle 4.5 dargestellten Grenzen, untersucht. Alle Beschichtungsversuche wurden mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit von $V =$

200 mm/s und einem konstanten Spritzabstand von $S = 110 \text{ mm}$ durchgeführt. Die WSC-Fe Schichten wurden anschließend hinsichtlich ihrer Schichtmorphologie und -topographie untersucht. Ziel hierbei war die Ermittlung von Prozessparametern zur Herstellung von dichten und glatten Schichten mit einer Feinstruktur, sowie einem guten adhäsiven und kohäsiven Schichtverbund.

Prozessparameter	Untersuchte Werte			
Primärgasdruck [bar]	-	2	4	6
Sekundärgasdruck [bar]	0	2	4	6
Spannung [bar]	28	30	32	34
Strom [A]	200	220	240	260

Tabelle 4.5: Zur Optimierung des lichtbogengespritzten Schichtsystems WSC-Fe untersuchte Prozessparameter

4.5.2 Untersuchung der Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Geometrien

In experimentellen Versuchsreihen wurden die wichtigsten Einflussgrößen zur Beschichtung komplexer Oberflächen ermittelt, in dem ebene Stahlsubstrate mit optimierten Prozessparametern gemäß Kapitel 5 für die Schichtsysteme WC-12Co und WSC-Fe beschichtet wurden. Dabei wurden die Parameter Spritzwinkel, Spritzabstand, Bahngeschwindigkeit, Verfahrgeschwindigkeit, Bauteilgeometrie und Art der Bahnplanung variiert. Zudem wurden verschiedene Kombinationen von Bahnplanungsparametern untersucht.

4.5.2.1 Untersuchung des Spritzwinkels

Zur Untersuchung des Einflusses des Spritzwinkels auf die Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten wurden rechteckige Stahlsubstrate mit einer Abmessung von $200 \times 100 \times 5 \text{ mm}^3$, mit Spritzwinkeln von $\alpha = 90^\circ - 30^\circ$, beschichtet. Bei einem Beschichtungsvorgang wurde die Spritzpistole mehrfach horizontal über das Substrat verfahren, so dass sich mittig auf dem Substrat eine Spritzbahn bildet (Abbildung 4.9). Ein senkrechter Schnitt durch dieses Profil entspricht einem Abdruck des Spritzstrahls. Zur Charakterisierung des Profils wurde mit einem optischen 3D-Profilometer der Höhenverlauf senkrecht über die Spritzbahn vermessen (in Abbildung 4.9 in z-Richtung). Außerdem wurden Querschliffe mittig in die Spritzbahn gelegt und diese metallographisch ausgewertet.

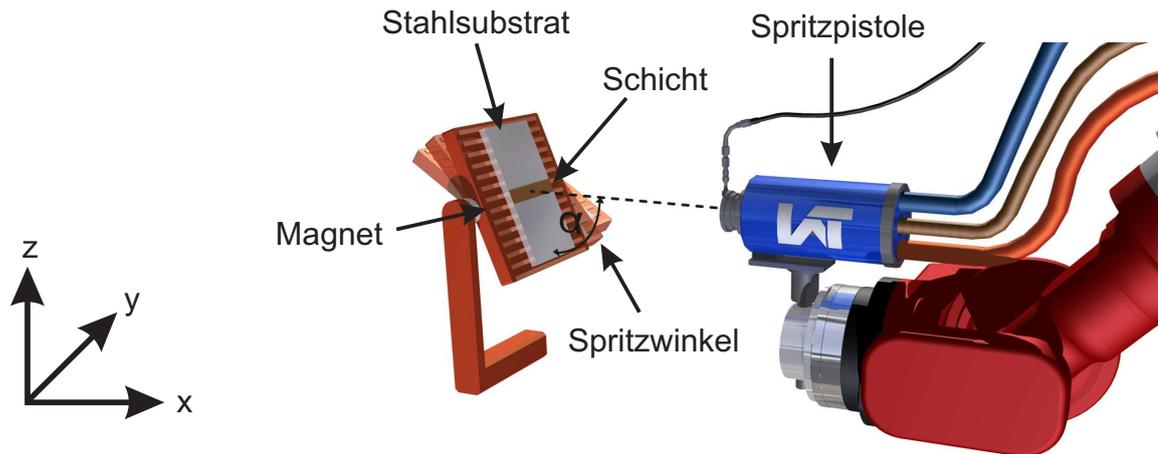


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung eines Beschichtungsvorgangs

Abbildung 4.10 zeigt ein repräsentatives Höhenprofil mit einer gaußschen Glockenform einer Spritzbahn. Ein gaußförmiges Höhenprofil wurde sowohl beim Atmosphärischen Plasmaspritzen als auch beim Lichtbogenspritzen beobachtet. Ein Gaußprofil ergibt sich immer dann, wenn eine große Zahl von Einflüssen auftritt und die einzelne Einflussgröße im Verhältnis zur Gesamtsumme einen unbedeutenden Beitrag liefert. Nach Definition ergibt eine Akkumulation der einzelnen Einflussgrößen eine Normal- oder Gaußverteilung [SH09]. Bei einem Thermischen Spritzprozess ist dies gegeben, wenn die heißen Spritzpartikel auf einem Substrat auftreffen, dort erstarren und eine Schicht bilden.

Zur Charakterisierung der gaußförmigen Höhenprofile wurden daher mathematische Anpassungen mit Gaußverteilungen vorgenommen und anschließend der Einfluss des Spritzwinkels auf die Profilform über Änderungen der geometrischen Parameter der Gaußverteilung diskutiert. Eine Gaußverteilung wird mathematisch beschrieben durch die Funktion:

$$z(l) := z_0 + \frac{z_{max}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{l-l_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (4.8)$$

Hierbei ist z_{max} ein Amplitudennormierungsfaktor, σ die Standardabweichung, l_0 der Mittelwert der Verteilung und z_0 eine additive Konstante. Die Abweichung einer gemessenen Verteilung von der idealen Normalverteilung lässt sich mathematisch durch die Schiefe s , die Kurtosis k und die Halbwertsbreite FWHM beschreiben:

$$s := \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (l_i - l_0)^3}{\sigma^3} \quad (4.9)$$

$$k := \left(\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (l_i - l_0)^4}{\sigma^4} \right) - 3 \quad (4.10)$$

$$FWHM := z(l_1) = z(l_2) = \frac{1}{2} z(l_{max}) \quad (4.11)$$

Die Schiefe s ist ein Maß für die Symmetrie der Verteilung bezogen auf den Mittelwert. Durch sie kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob eine Verteilung linksseitig ($s < 0$) oder rechtsseitig ($s > 0$) verkippt ist. Die Kurtosis k gibt an, ob eine flachgipflige ($k < 0$) oder steilgipflige ($k > 0$) Verteilung im Vergleich zur Normalverteilung vorliegt. Die Halbwertsbreite $FWHM$ gibt den Abstand zweier Abszissenwerte an, für welche der Funktionswert auf die Hälfte des Maximums der Verteilung abgesunken ist. Die Halbwertsbreite ist streng proportional zur Standardabweichung. Eine schematische Darstellung der geometrischen Parameter einer Gaußverteilung lassen sich in Abbildung 4.10 finden.

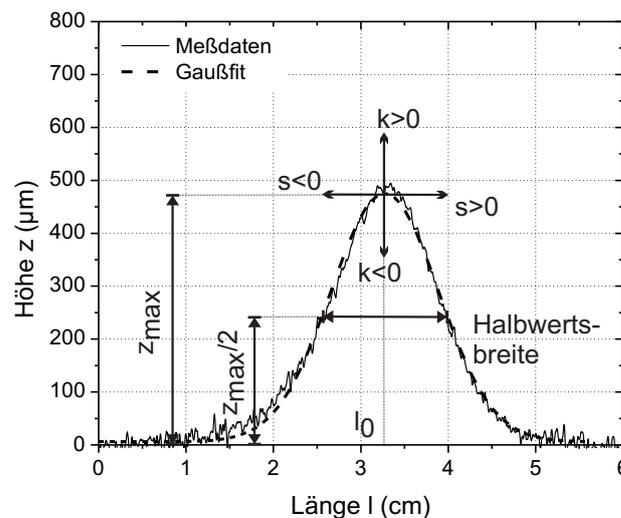


Abbildung 4.10: Experimentell gemessenes Spritzprofil und eine gaußsche Anpassung des Profils (WC-12Co, $\alpha = 90^\circ$)

4.5.2.2 Untersuchung des Spritzabstandes, des Bahnabstandes und der Verfahrgeschwindigkeit

Zur Untersuchung des Einflusses der Handhabungsparameter Spritzabstand, Bahnabstand und Verfahrgeschwindigkeit auf die Schichteigenschaften wurden rechteckige Stahlsubstrate mit den Abmessungen $70 \times 50 \times 10 \text{ mm}^3$ beschichtet. In einem Beschichtungsversuch wurden die Substrate mit einer mäanderförmigen Bahn beschichtet und

es wurde nur jeweils ein Handhabungsparameter variiert. Die anderen Größen wurden im Versuch konstant gehalten. Die eingesetzten Kombinationen sind in Tabelle 4.6 aufgelistet.

Experiment	Spritzabstand [mm]		Bahnabstand [mm]		Verfahrgeschwindigkeit [mm/s]	
	WC-12Co	WSC-Fe	WC-12Co	WSC-Fe	WC-12Co	WSC-Fe
Spritzabstand	50-180	50-180	5	5	500	200
Bahnabstand	115,85	110	3-11	3-11	500	200
Verfahrgeschwindigkeit	115,85	110	5	5	167-833	50-350

Tabelle 4.6: Handhabungsparameter zur Untersuchung des Spritzabstandes, des Bahnabstandes und der Verfahrgeschwindigkeit

4.5.2.3 Kombination von Bahnplanungsparametern

Unterschiedliche Kombinationen von Bahnplanungsparametern wurden untersucht, in dem rechteckige Stahlsubstrate mit den Abmessungen 70x50x10 mm³ mit mäanderförmigen Bahnen, unter gleichzeitiger Variation von zwei oder drei Bahnplanungsparametern, beschichtet wurden. Anschließend wurde die Schichtdicke der Spritzschichten lichtmikroskopisch an Querschliffen ermittelt und mit den vorhergesagten Werten der empirischen Modelle verglichen.

4.5.2.4 Untersuchung des Einflusses der Bauteilkontur und der Bahnstrategie

Verschiedene regelgeometrische Bauteile wurden mit einer mäanderförmigen Bahn mit einem Bahnabstand von 5 mm beschichtet. Zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilkontur wurde eine vertikale Bahnstrategie verwendet, bei der die Spritzpistole mit Linearbahnen vertikal über die Bauteiloberfläche verfährt und alle Richtungsänderungen außerhalb des Bauteils vorgenommen werden (Abbildung 4.11a). Bei der Untersuchung des Einflusses der Bahnstrategie wurde zusätzlich noch eine horizontale Bahnstrategie eingesetzt. Bei dieser bewegt sich die Spritzpistole horizontal über das Bauteil, so dass alle Richtungsänderungen der Spritzpistole, durch den Beschichtungsroboter, auf der Bauteiloberfläche vorgenommen werden (Abbildung 4.11b). Die Bahnplanung erfolgte mittels Offline-Bahnplanungssoftware. Im nächsten Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der offline gestützten Entwicklung einer Spritzbahn erläutert.

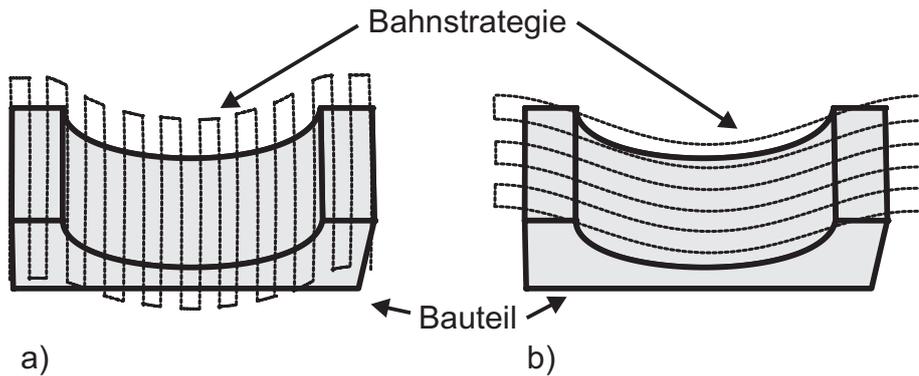


Abbildung 4.11: Eingesetzte Bahnstrategien zur Beschichtung von regelgeometrischen Bauteilen, a) vertikale Bahnstrategie, b) horizontale Bahnstrategie

4.5.3 Beschichtung komplexer Geometrien

Die Bahnplanung zur Beschichtung komplexer Bauteile wurde mittels Offline-Programmierungssoftware vorgenommen. Die allgemeine Vorgehensweise zur Erzeugung eines Beschichtungsprogramms ist dabei wie folgt:

1. Eine maßstabsgetreue CAD-Zeichnung des zu beschichtenden Bauteils wird mit einer beliebigen CAD-Software (z.B. SolidWorks [Das10], AutoCAD [Aut10]) erstellt.
2. Die CAD-Zeichnung des Bauteils wird in die Software RoPaGen importiert³. Mit dieser Software kann auf Grundlage von Distanzfeldern eine Bahnplanung auf einer beliebigen Bauteiloberfläche vorgenommen werden. Dazu wird auf der Bauteiloberfläche ein Startpunkt gewählt und definiert mit welcher Strategie die Spritzbahn generiert werden soll. Nach Definition dieser Randbedingungen führt die Software RoPaGen eine vollautomatische Bahnplanung aus. Die Spritzbahn lässt sich anschließend als RAPID Modul exportieren und kann daher direkt in einer Offline-Roboterprogrammierungssoftware weiterverarbeitet werden. Genauere Details zu der Software RoPaGen und der mathematischen Bahnplanung mit Distanzfeldern können in den Veröffentlichungen von Müller und Kout [KM10, MK10] nachgelesen werden.
3. Mit der Software RobotStudio [ABB10] wird ein dreidimensionales Abbild des Beschichtungszentrums erzeugt. Dazu werden die Spritzpistole, das zu beschicht-

³Die Software RoPaGen wurde am Lehrstuhl Informatik VII der Technischen Universität Dortmund entwickelt.

tende Bauteil und alle weiteren relevanten Komponenten als CAD-Dateien importiert und zusammen mit einem Modell des Beschichtungsroboters zu einer Beschichtungszelle verknüpft (Abbildung 4.12). Durch Einmessen der Bauteile in dem tatsächlichen Beschichtungszentrum wird gewährleistet, dass die modellierte Beschichtungszelle mit der Realität übereinstimmt. In diese Beschichtungszelle wird die in RoPaGen erzeugte Spritzbahn importiert und durch eine Verknüpfung der Koordinatensysteme auf das zu beschichtende Bauteile gelegt. In der Software Robotstudio werden anschließend der Start- und der Endpunkt der Spritzbahn sowie die Anzahl der Überläufe programmiert. Das fertige Programm wird schließlich auf die Robotersteuerung übertragen.

4. Bevor das Programm auf dem Roboter ausgeführt werden kann, müssen der Arbeitspunkt (TCP - Tool Center Point) der Spritzpistole und das Werkobjekt eingemessen werden. Für eine genaue Einmessung des TCPs hat es sich als zweckmäßig erwiesen, eine Spitze mit der Länge des Spritzabstands auf die Spritzpistole zu schrauben und diese zu vermessen. Hierdurch können Meßfehler minimiert werden. Anschließend kann das Beschichtungsprogramm gestartet werden. Allerdings müssen häufig noch Feinabstimmungen durchgeführt werden, bevor der tatsächliche Beschichtungsprozess durchgeführt werden kann. Dazu gehören beispielsweise die Anpassung der Beschleunigungs- und Verzögerungswege der Spritzpistole außerhalb des Bauteils, um ein Aufschwingen des Kabelpakets zu verhindern.

Nach ihrer Beschichtung werden die Bauteile getrennt, präpariert und metallographisch untersucht. Dabei werden anhand von Schliffen die Schichtdickenverteilung über die Bauteiloberfläche gemessen und die Härte, Rauheit und Porosität der Beschichtung aufgenommen. Diese Größen werden dann zur Analyse der Beschichtung genutzt.

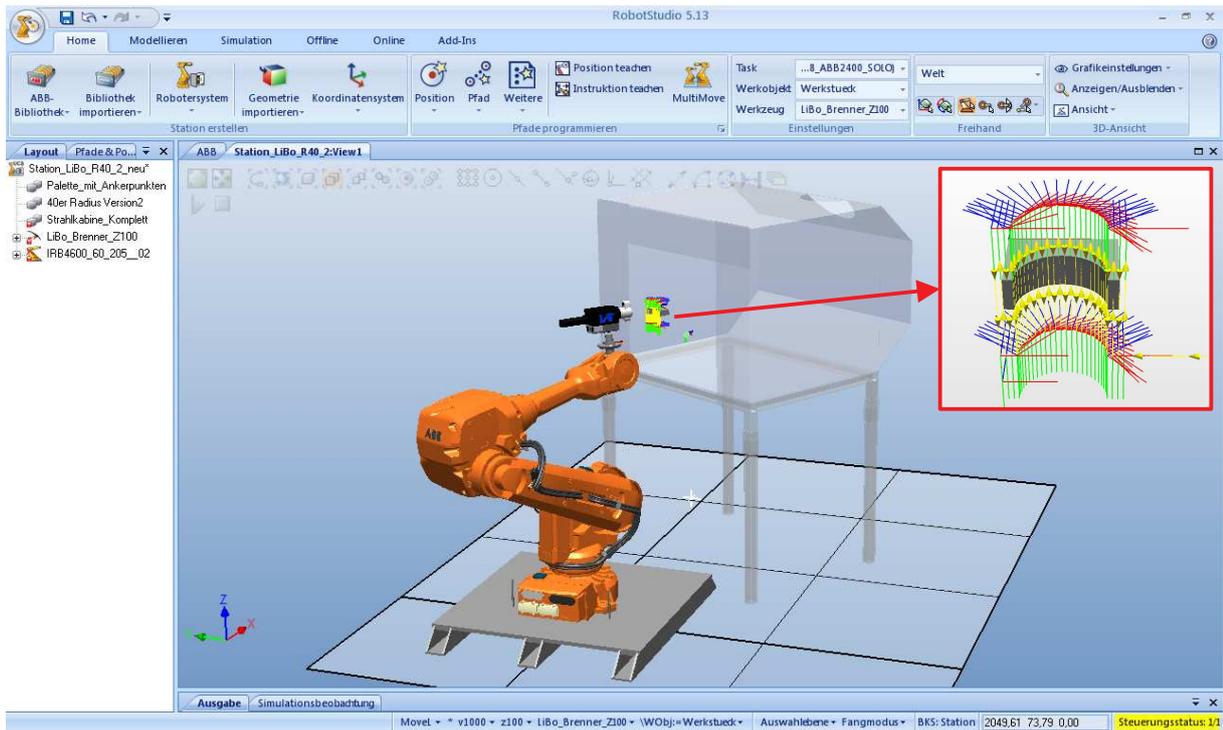


Abbildung 4.12: Offline-Programmierung des Beschichtungspfades in der Software Robotstudio 5.13 anhand eines Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ [ABB10]

Kapitel 5

Prozessparameterstudien zur Optimierung von Schichtsystemen

Die endkonturnahe Beschichtung von komplexen Bauteilen mit verschleißfesten, karbidischen Spritzschichten erfordert eine Optimierung der Prozessparameter. Bestmögliche Ergebnisse im Einsatz der beschichteten Bauteile können nur dann erreicht werden, wenn die Beschichtungen hochqualitative Eigenschaften wie eine dichte Morphologie, eine glatte Topographie, eine hohe Adhäsion und Kohäsion im Schichtverbund sowie geringe Degradationen der Karbide aufweisen. Zur Erzielung dieser Eigenschaften müssen im Spritzprozess die Prozessparameter an den jeweiligen Spritzwerkstoff angepasst werden. Dazu werden in der Regel Prozessparameterstudien durchgeführt, in denen Korrelationen zwischen den Eigenschaften der Beschichtung und den Parametern des Spritzprozesses aufgestellt werden. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, werden hierbei in der Fachliteratur im Wesentlichen zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Bei einer hohen Anzahl an Einflussgrößen im Spritzprozess oder, bei komplexen Wechselwirkungen, wird ein statistischer Versuchsplan zur Untersuchung und Optimierung der Sachverhalte eingesetzt. Eine derartige Vorgehensweise wurde zur Optimierung des atmosphärisch plasmagespritzten Schichtsystems WC-12Co verwendet. Ein statistischer Versuchsplan kann aber nur dann zielführend eingesetzt werden, wenn durch entsprechende Vorarbeiten die Grenzen der Prozessparameter gut abgeschätzt werden können. Diese Voraussetzung ist bei dem Schichtsystem WC-12Co aufgrund der vielfältigen Untersuchungen in der Fachliteratur gegeben (z.B. [SSS86,GTZ91,WK92,KKC94]). Das lichtbogengespritzte WSC-Fe hingegen ist ein recht neues und noch nicht ausreichend erforschtes Schichtsystem. Daher wurde dieses Schichtsystem mit den Methoden der klassischen Versuchsplanung optimiert. Die klassische Versuchsplanung ermöglicht die Zusammenhänge zwischen den Prozess-

und den Meßgrößen detailliert zu studieren. Allerdings ist das Ergebnis der Optimierung in der Regel nicht das bestmöglich erreichbare Optimum.

5.1 Optimierung des Schichtsystems WC-12Co

Die Optimierung des atmosphärisch plasmagespritzten Schichtsystems WC-12Co wurde mittels eines statistischen Versuchsplans, dem Central Composite Design, vorgenommen. In dem Versuchsplan wurde durch eine systematische Variation der Einfluss der **Prozessparameter Verhältnis Ar/H_2 , Gasdurchsatz, Pulverfördertrate und Spritzabstand** auf das Schichtgefüge untersucht. Anschließend wurde mittels multikriterieller Regression, in Kombination mit dem Konzept der Wünschbarkeit, das Schichtsystem optimiert. Genauere Details können im Experimentellen (Kapitel 4.5.1.1) nachgelesen werden. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Untersuchung vorgestellt und diskutiert. Im Anschluß wird auf Grundlage der Ergebnisse ein Modell zur Vorhersage von Schichteigenschaften erstellt und evaluiert.

5.1.1 Einfluss der Prozessparameter auf Schichteigenschaften

Zur Erlangung eines grundlegenden Verständnisses der thermo-kinetischen Vorgänge bei einer Variation der Prozessparameter wurden zunächst die Partikeltemperatur und -geschwindigkeit, in Abhängigkeit der untersuchten Prozessparameter, aufgenommen. In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse der Messungen in Form von Pareto Diagrammen dargestellt. Die Partikeltemperatur und -geschwindigkeit werden hauptsächlich durch die Prozessgrößen Spritzabstand, Gasdurchsatz und Pulverfördertrate beeinflusst. Bei der Partikeltemperatur treten zusätzlich noch mehrere Zweifachwechselwirkungen auf.

Der Spritzabstand hat einen negativen linearen Effekt auf die Partikeltemperatur und -geschwindigkeit. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung des Spritzabstandes zu einem Absinken beider Partikeleigenschaften führt. Dieses Erkenntnis ist konform zu den Ergebnissen des Stand der Technik (Kapitel 2.5.2). Durch vermehrt auftretende, inelastische Stoßvorgänge der Spritzpartikel mit der Umgebungsluft, sowie durch Konvektion und Wärmestrahlung verlieren die Partikel ihre thermische und kinetische Energie und folglich sinken die Partikeltemperatur und -geschwindigkeit ab. Für eine detaillierte Erklärung der Zusammenhänge sei hier auf das Kapitel 6.2 verwiesen. Eine Erhöhung des Gasdurchsatzes bewirkt dagegen einen Anstieg der Parti-

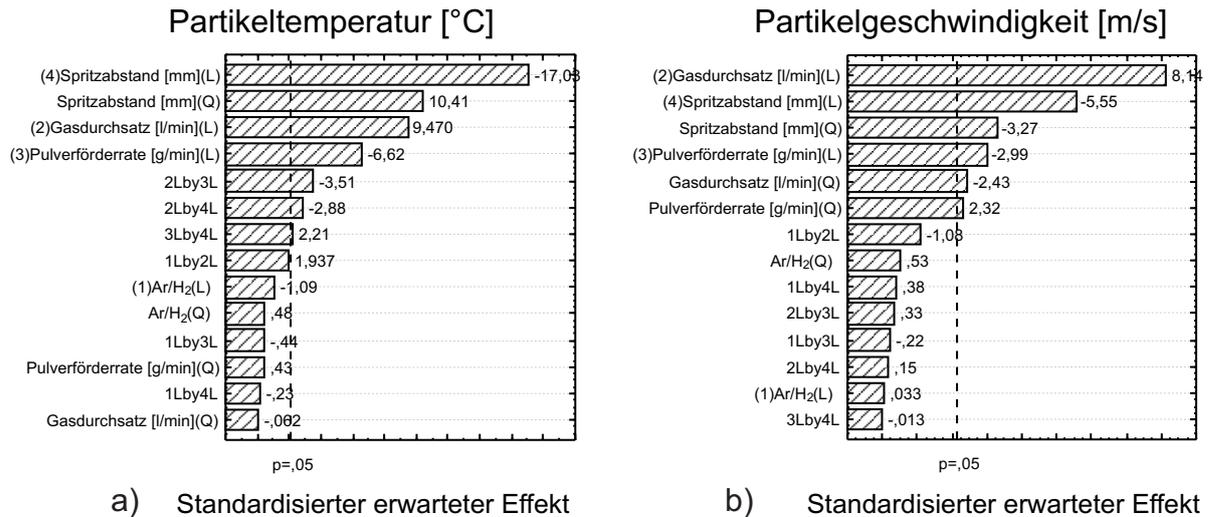


Abbildung 5.1: Pareto Diagramme a) der Partikeltemperatur und b) der Partikelgeschwindigkeit von WC-12Co Schichten

keltemperatur und -geschwindigkeit. In der Fachliteratur wird mehrfach darauf verwiesen, dass höhere Gasdurchsätze eine deutlich höhere Partikelgeschwindigkeit zur Folge haben, während nur ein geringfügiger Anstieg der Partikeltemperatur auftritt [VVF93, RYNB03]. Dieser Zusammenhang kann zum Teil anhand der Partikeldiagnostik bestätigt werden. Zwischen 52 l/min und 92 l/min tritt ein Anstieg der Partikelgeschwindigkeit um 12 % auf 200 m/s und der Partikeltemperatur um 9 % auf 2460 °C auf. Ein weiterer signifikanter Effekt auf die Partikeltemperatur und -geschwindigkeit wurde für die Pulverförderrate ermittelt. Wird in den Spritzprozess mehr Spritzpulver eingebracht, so sinken sowohl die Partikeltemperatur als auch die Partikelgeschwindigkeit ab. Die Ursache dafür ist die Tatsache, dass bei höheren Pulverförderraten dieselbe Plasmaenergie in eine größere Pulvermenge eingebracht werden muss. Folglich nimmt das einzelne Spritzpartikel eine geringere thermische und kinetische Energie auf [CPN00, FPNW01].

Der überproportionale Anstieg der Partikelgeschwindigkeit gegenüber der Partikeltemperatur spiegelt sich in dem Schichtgefüge der WC-12Co Schichten wieder. Durch die höhere Partikelgeschwindigkeit sinkt die Aufenthaltszeit der Spritzpartikel in der heißen Plasmaflamme ab [RNY03, TVB⁺08]. Es treten weniger thermische Reaktionen mit der Flamme und der Umgebungsluft auf, wodurch sich Schichten mit einer geringeren Dekaburisierung des Wolframkarbids ausbilden [OM68, TBM16]. Dieser Sachverhalt ist in den Diagrammen in Abbildung 5.2 dargestellt. Mit zunehmendem Gasdurchsatz sinkt der Anteil an geschmolzenen Karbiden im Schichtgefüge ab. Lediglich oberhalb von 82 l/min tritt ein leichter Anstieg zu höheren Anteilen an geschmolzenen Karbiden auf, der sich auf Ungenauigkeiten des Messverfahrens zurückführen lässt.

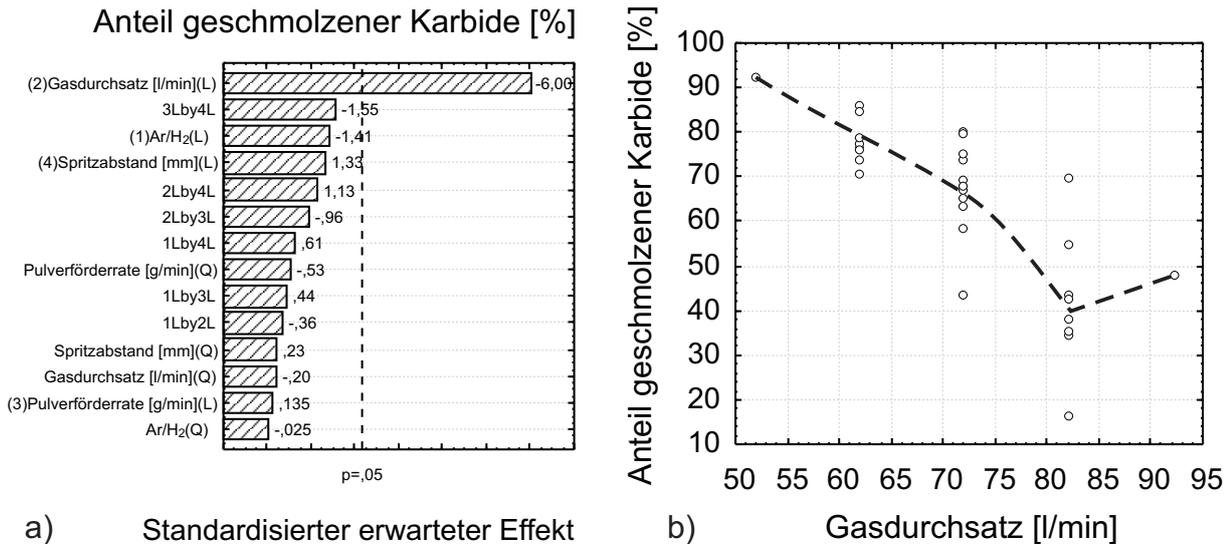


Abbildung 5.2: a) Pareto Diagramm des Anteils der geschmolzenen Karbide in plasma-gespritzten WC-12Co Schichten, b) Anteil der geschmolzenen Karbide als Funktion des Gasdurchsatzes

Abbildung 5.3 zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der WC-12Co Schichten bei verschiedenen Gasdurchsätzen. Bei geringen Gasdurchsätzen ist ein stark ungeschmolzenes Schichtgefüge deutlich erkennbar. Dies deutet auf eine thermische Zersetzung der Wolframkarbide hin, bei der sich spröde Phasen wie beispielsweise W_2C , Co_3W_3C oder Co_6W_6C bilden [Exn79]. Bei höheren Gasdurchsätzen weisen die Schichten dagegen einen deutlich geringeren Anteil an geschmolzenen Karbiden auf und es bildet sich eine Mischstruktur aus ungeschmolzenen und stark geschmolzenen Regionen. In den ungeschmolzenen Regionen lässt sich die Ausgangsmorphologie des Spritzpulvers mit scharfkantigen Wolframkarbiden, eingebettet in einer Kobaltmatrix, erkennen.

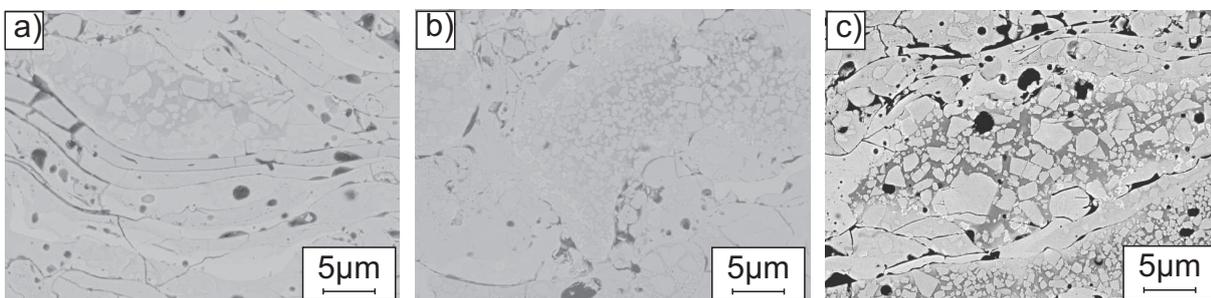


Abbildung 5.3: REM Detailaufnahmen von WC-12Co Schichten, hergestellt mit einem Gasdurchsatz von a) 62 l/min, b) 72 l/min, c) 82 l/min

Die größeren Partikelgeschwindigkeiten bei höheren Gasdurchsätzen führen darüber hinaus zu einer dichteren Schichtstruktur. Beim Aufprall auf das Substrat flachen die Spritzpartikel bei höheren Gasdurchsätzen, als Folge ihrer hohen kinetischen Energie,

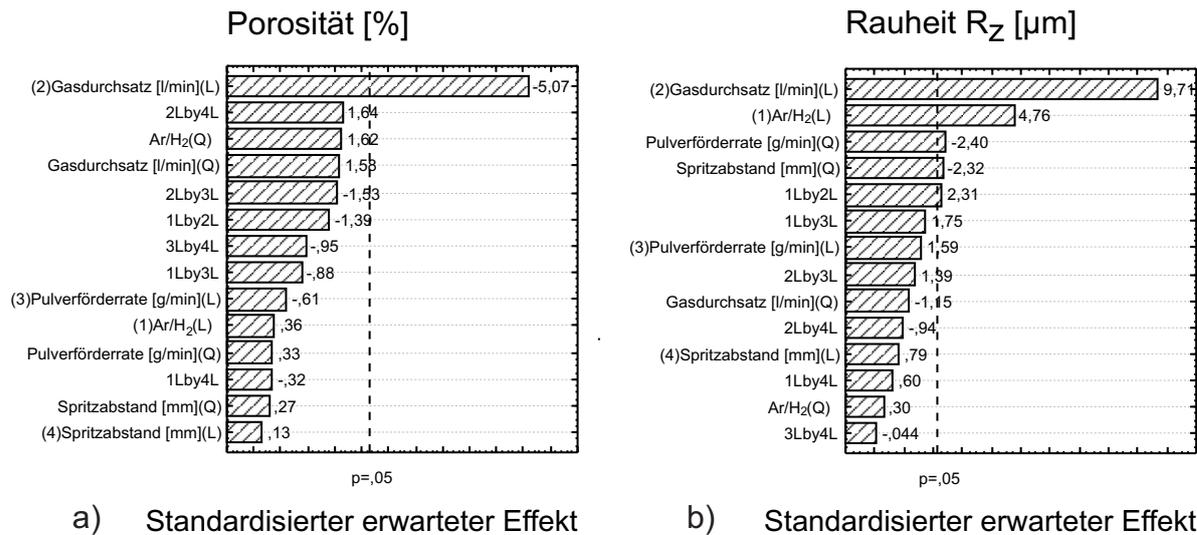


Abbildung 5.4: Pareto Diagramme a) der Porositäts- und b) der Rauheitsmessungen für das Schichtsystem WC-12Co

stärker ab, was zu einem Absinken der Schichtporosität führt (Abbildung 5.4a). Es tritt ein signifikanter linearer Effekt des Gasdurchsatzes auf die Porosität auf. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in den Arbeiten von Antou et al. ermittelt [AMH⁺06]. Parallel zu dem Absinken der Porosität kommt es allerdings zu einem Anstieg der Rauheit der Spritzschichten (Abbildung 5.4b). Dieses Phänomen lässt sich auf die geringere thermische Zersetzung der Spritzpartikel bei höheren Gasdurchsätzen zurückführen. Daraus resultieren bei höheren Gasdurchsätzen Agglomerate aus ungeschmolzenen Pulverpartikeln auf der Schichtoberfläche, welche die Schichtrauheit ansteigen lassen. Abbildung 5.5 visualisiert anhand von repräsentativen Querschliffen den Abfall der Porosität und den Anstieg der Schichtrauheit bei einer Erhöhung des Gasdurchsatzes.

Es wurden weitere Effekte ermittelt, die die Rauheit der WC-12Co Schichten beeinflussen. Einen besonders ausgeprägten Einfluss auf die Schichtrauheit hat das Verhältnis der Plasmagase Ar/H_2 . Wird der Anteil an Wasserstoff im Plasma verringert, so steigt die Rauheit der Spritzschichten an. Plasmen mit geringen Wasserstoffanteilen weisen eine geringe Plasmaenthalpie, eine geringe thermische Leitfähigkeit und eine geringe Plasmageschwindigkeit sowie eine hohe Plasmaviskosität auf [FCV⁺87, JMV⁺99, VVZ⁺02, GMC04]. Im Spritzprozess nehmen die Spritzteilchen dadurch eine geringere thermische und kinetische Energie auf und es bilden sich, genau wie bei hohen Gasdurchsätzen, Agglomerate aus nur geringfügig angeschmolzenen Partikeln auf der Schichtoberfläche, welche die Schichtrauheit erhöhen.

In Abbildung 5.6 sind Paretodigramme von Kleinlasthärte- und Spannungsmessun-

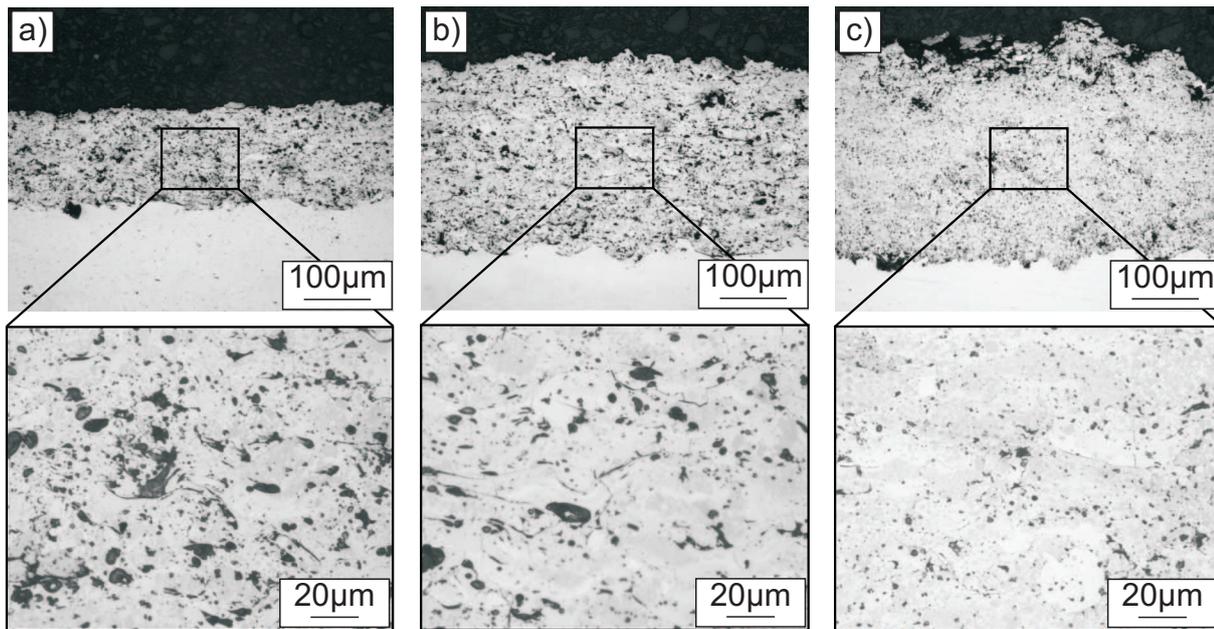


Abbildung 5.5: Lichtmikroskopische Aufnahmen plasmagespritzter WC-12Co Schichten bei einem Gasdurchsatz von a) 62 l/min, b) 72 l/min, c) 82 l/min

gen der WC-12Co Schichten dargestellt. Die Kleinlasthärte der Spritzschichten (Abbildung 5.6a) wird durch einen positiven linearen und einen negativen quadratischen Effekt des Gasdurchsatzes, sowie durch einen negativen quadratischen Effekt des Spritzabstandes, beeinflusst. Der Effekt des Gasdurchsatzes auf die Kleinlasthärte korreliert mit der im Vorhinein diskutierten Änderung der Anteile an geschmolzenen Karbiden im Schichtgefüge bei einer Variation des Gasdurchsatzes. Bei geringen Gasdurchsätzen bildet sich ein stark umgeschmolzenes Schichtgefüge. Aufgrund der hohen thermischen Zersetzung der Wolframkarbide bei diesem Prozess, weisen die resultierenden Schichten eine niedrige Härte auf. Eine Erhöhung des Gasdurchsatzes bewirkt hingegen einen Anstieg der kinetischen Energie der Spritzpartikel. Zudem treten durch die kürzere Aufenthaltszeit der Spritzpartikel in der heißen Zone der Plasmaflamme geringere Dekarburisierungen der Wolframkarbide auf. Die Spritzschichten weisen dadurch eine dichte und nur wenig umgeschmolzene Mikrostruktur auf, was zu einem Anstieg der Härte führt.

Die Spannung der WC-12Co Schichten steigt bei einer Erhöhung des Gasdurchsatzes deutlich an. In dem Pareto Diagramm ist ein positiver Effekt des Gasdurchsatzes, der auf ein Auftreten von Zugspannungen hindeutet, ersichtlich (Abbildung 5.6b). Dies liegt begründet in der Tatsache, dass bei höheren Gasdurchsätzen ein stärkerer Wärmestrom in Richtung der Substratoberfläche auftritt. Durch den stärkeren Wärmestrom wird das Substrat aufgeheizt und dehnt sich aus, wodurch beim Abkühlen des Sub-

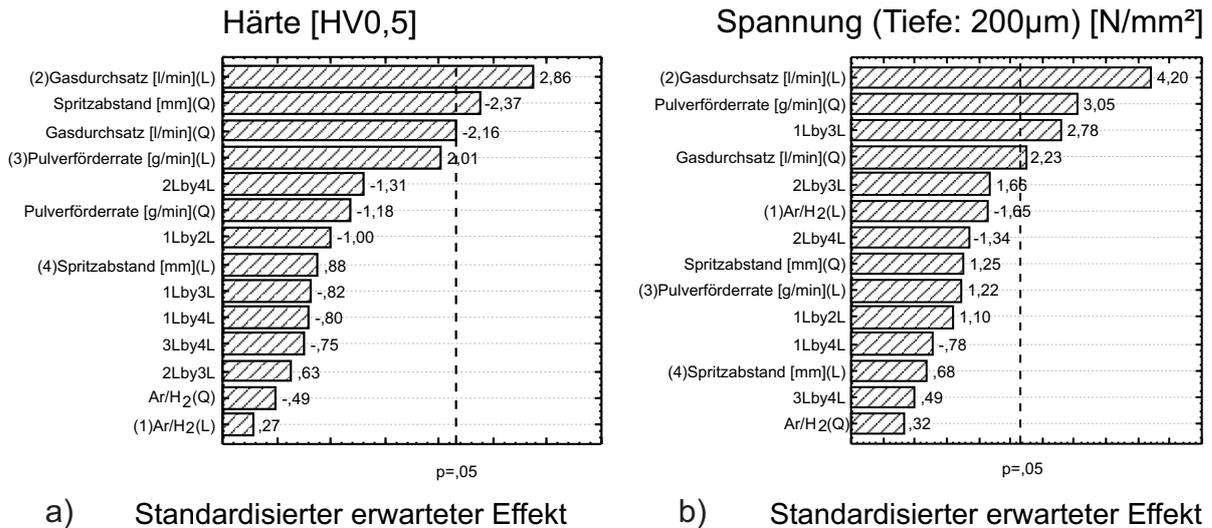


Abbildung 5.6: Pareto Diagramme a) der Mikrohärte und b) der Spannung in einer Tiefe von 200 µm

strates nach dem Beschichtungsvorgang eine größere thermische Schrumpfung auftritt und sich Zugspannungen in der Beschichtung ausbilden. Das Auftreten von Zugspannungen ist ein typisches Charakteristikum von atmosphärisch plasmagespritzten Schichten. Allerdings können sehr hohe Zugspannungen zu einem Abplatzen der Beschichtung im Einsatz führen und sind daher zur Gewährleistung eines hohen Verschleißschutzes zu vermeiden. Die maximale Zugspannung wurde in den WC-12Co Schichten bei einem Gasdurchsatz von 921/min mit 71 N/mm² gemessen. Eine derart hohe Zugspannung könnte bereits zu Qualitätseinbußen der Beschichtung im Einsatz führen. Neben dem Gasdurchsatz wurden weitere Einflussgrößen auf die Spannung, wie ein quadratischer Effekt der Pulverfördertrate und des Gasdurchsatzes, sowie eine lineare Zweifachwechselwirkung zwischen dem Verhältnis Ar/H_2 und der Pulverfördertrate, ermittelt.

Die Pareto Diagramme der Auftragsrate und der Haftzugfestigkeit lassen einen signifikanten Haupteffekt der Pulverfördertrate erkennen. Dabei tritt bei der Auftragsrate ein positiver linearer Effekt und bei der Haftzugfestigkeit ein negativer linearer Effekt auf (Abbildung 5.7). Eine Erhöhung der Pulverfördertrate führt somit zu einem Anstieg der Auftragsrate in Verbindung mit einem Abfall der Haftzugfestigkeit. Dieser Zusammenhang kann auf die größere Menge an Pulver, die bei einer höheren Pulverfördertrate in die Plasmaflamme injiziert wird, zurückgeführt werden. Die Pulverbeladung des Plasmas steigt hierdurch an und als Folge dessen treffen mehr Pulverpartikel in der gleichen Zeitspanne auf das Substrat auf. Gleichzeitig sinkt der thermische Energieeintrag in das einzelne Partikel ab und es bilden sich Spritzschichten mit einer geringen Adhäsion und Kohäsion. Desweiteren wird die Auftragsrate durch einen positi-

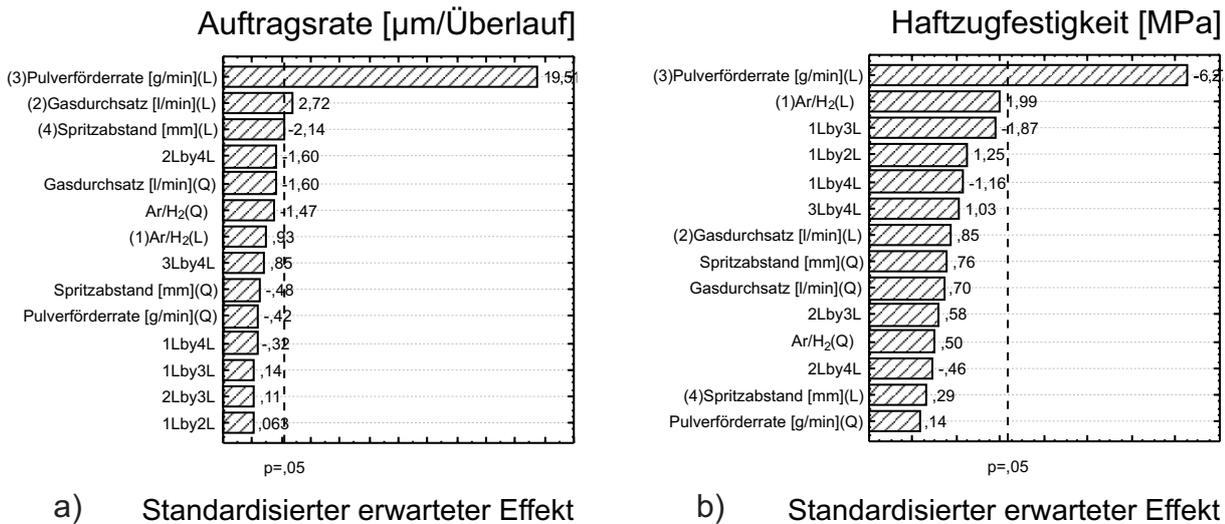


Abbildung 5.7: Pareto Diagramme a) der Auftragsrate und b) der Haftzugfestigkeit

ven linearen Effekt des Gasdurchsatzes und durch einen negativen linearen Effekt des Spritzabstandes beeinflusst. Wie bereits diskutiert, steigt bei höheren Gasdurchsätzen die Partikelgeschwindigkeit überproportional an, wodurch die Partikel beim Aufprall stärker abflachen und die Porosität der Spritzschichten absinkt. Parallel dazu treffen die Spritzpartikel mit einer höheren kinetischen Energie auf das Substrat auf und tragen dadurch größtenteils zur Schichtbildung bei. Zusätzlich steigt bei einer Verringerung des Spritzabstandes der thermische Energieeintrag in die Substratoberfläche an. In Übereinstimmung mit dem Stand der Technik (Kapitel 2.5.2) und den Ergebnissen aus Kapitel 6.2 erhöht sich somit die Auftragsrate.

5.1.2 Modellbildung und Evaluation des Modells

Im Anschluß an die Ermittlung der signifikanten Haupteffekte im Spritzprozess wurde eine Optimierung der Schichteigenschaften durchgeführt. Dazu wurden die gemessenen Schichteigenschaften durch Regressionsmodelle angepasst und nach Evaluierung der Regressionsmodelle ein globales Optimum mit dem Konzept der Wünschbarkeiten ermittelt. In den hier durchgeführten Arbeiten wurde eine quadratische Regression mit der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt. Das Ergebnis ist eine quadratische Funktion, die den theoretischen Verlauf des Messwertes beschreibt. Diese Regression wurde für jede Schichteigenschaft aufgestellt und anschließend zur Vorhersage einzelner Schichteigenschaften genutzt.

In Abbildung 5.8 sind die quadratischen Regressionmodelle für die Porosität, die Rauheit, die Auftragsrate und den Anteil an geschmolzenen Karbiden als Funktion

des Gasdurchsatzes und des Verhältnis Ar/H_2 dargestellt. Die dazugehörigen mathematischen Regressionfunktionen finden sich im Anhang. Die Konturdiagramme in der Abbildung zeigen die Punkte des Central Composite Designs (weiße Punkte), die Regressionsmodelle (farbige Kontur) sowie das globale Optimum (schwarzes Kreuz). In den Diagrammen lassen sich die theoretischen Verläufe der Messwerte bei einer Veränderung des Gasdurchsatzes oder des Verhältnis Ar/H_2 deutlich erkennen. Auffällig ist, dass die Porosität, die Auftragsrate und der Anteil an geschmolzenen Karbiden ihren Optimalwert bei hohen Gasdurchsätzen haben. Im Gegensatz dazu tritt das Optimum der Rauheit bei geringen Gasdurchsätzen auf. Eine gleichzeitige Optimierung verschiedener Schichteigenschaften kann daher nicht den Bestwert eines jeden Messwertes widerspiegeln, sondern stellt einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Messwerten dar.

Bei dem Einsatz einer quadratischen Regression kann nicht immer gewährleistet werden, dass die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und den Schichteigenschaften fehlerfrei beschrieben werden. Besonders streuende Messwerte oder un stetige Verläufe führen zu starken Abweichungen zwischen dem Experiment und der Theorie. Für eine zuverlässige Schichtvorhersage ist daher die Kenntnis der Güte der Regression notwendig. Eine Gegenüberstellung der beobachteten und der vorhergesagten Werte in einem x - y -Diagramm ist die einfachste Möglichkeit bei der statistischen Versuchsplanung zur Überprüfung der Modellgüte. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei einer hohen Korrelation der Daten ein linearer Zusammenhang auftritt, dessen Güte durch das lineare Bestimmtheitsmaß charakterisiert werden kann. In Abbildung 5.9 sind beispielhaft die vorhergesagten und die beobachteten Werte für die Partikeltemperatur und die Kleinlasthärte dargestellt. Die Partikeltemperatur konnte mit einer hohen Bestimmtheit von $R^2 = 0,98$ modelliert werden. Dementsprechend liegen die vorhergesagten und die modellierten Werte auf einer Geraden. Dagegen weist das Modell der Kleinlasthärte nur eine geringe Bestimmtheit von $R^2 = 0,67$ mit den experimentellen Daten auf und in der Abbildung zeigt sich daher eine hohe Streuung der Messwerte. In Tabelle 5.1 sind die ermittelten Bestimmtheitsmaße der verschiedenen Schichteigenschaften aufgelistet. Es lässt sich erkennen, dass in den meisten Fällen die experimentellen Ergebnisse gut durch die theoretischen Anpassungen beschrieben werden können. Besonders hohe Bestimmtheitsmaße oberhalb von $R^2 = 0,90$ wurden für die Partikeltemperatur, die Partikelgeschwindigkeit, die Rauheit und die Auftragsrate ermittelt. Die Härte und die Porosität hingegen weisen Bestimmtheitsmaße von $R^2 \leq 0,75$ auf. Bei der Vorhersage dieser Schichteigenschaften sind deshalb Abweichungen zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Wer-

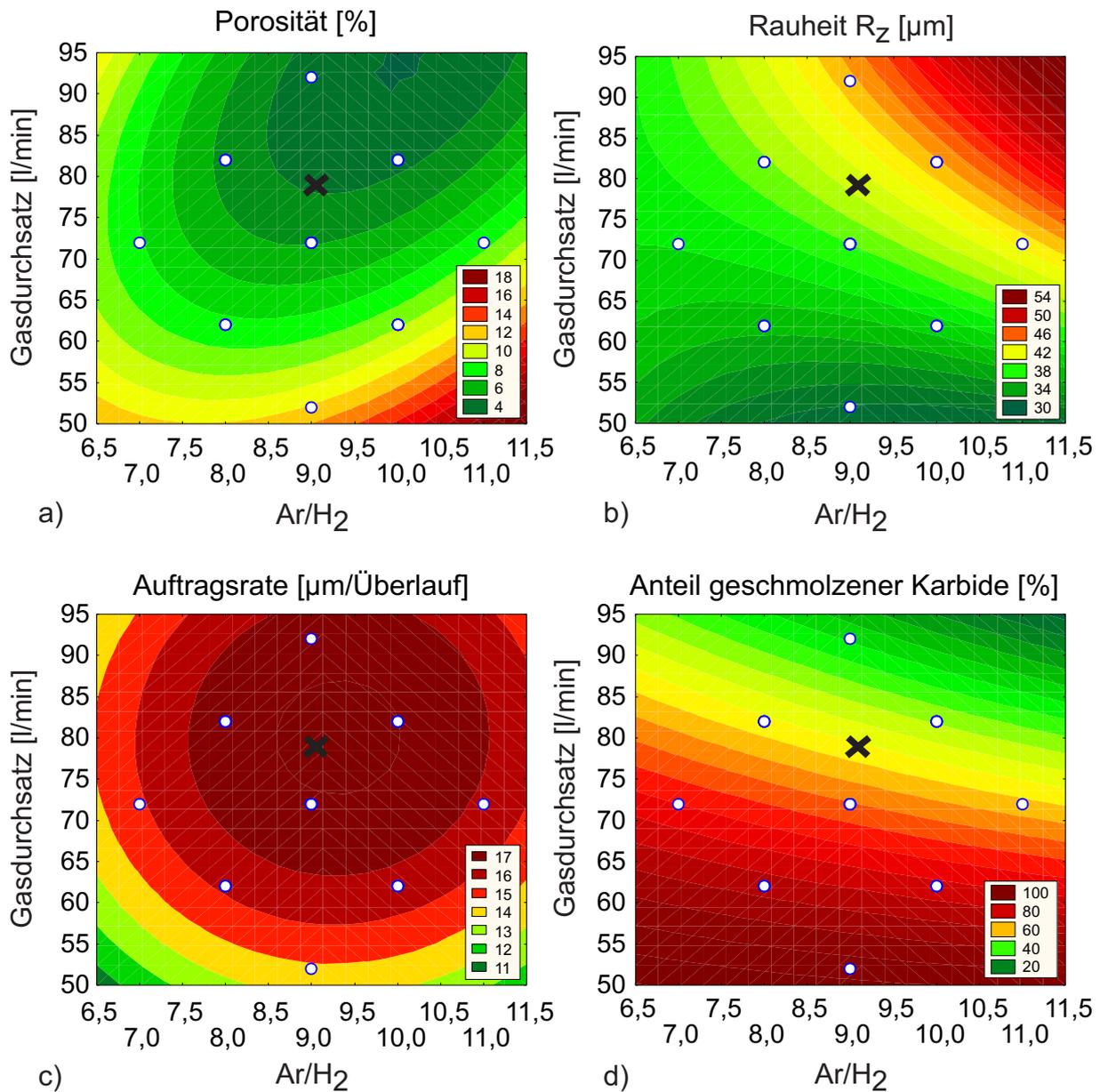


Abbildung 5.8: Konturdiagramm der a) Porosität, b) der Rauheit R_z , c) der Auftragsrate und d) des Anteils geschmolzener Karbide. Die weißen Punkte repräsentieren die Punkte des Central Composite Designs. Das schwarze Kreuz ist das berechnete Optimum.

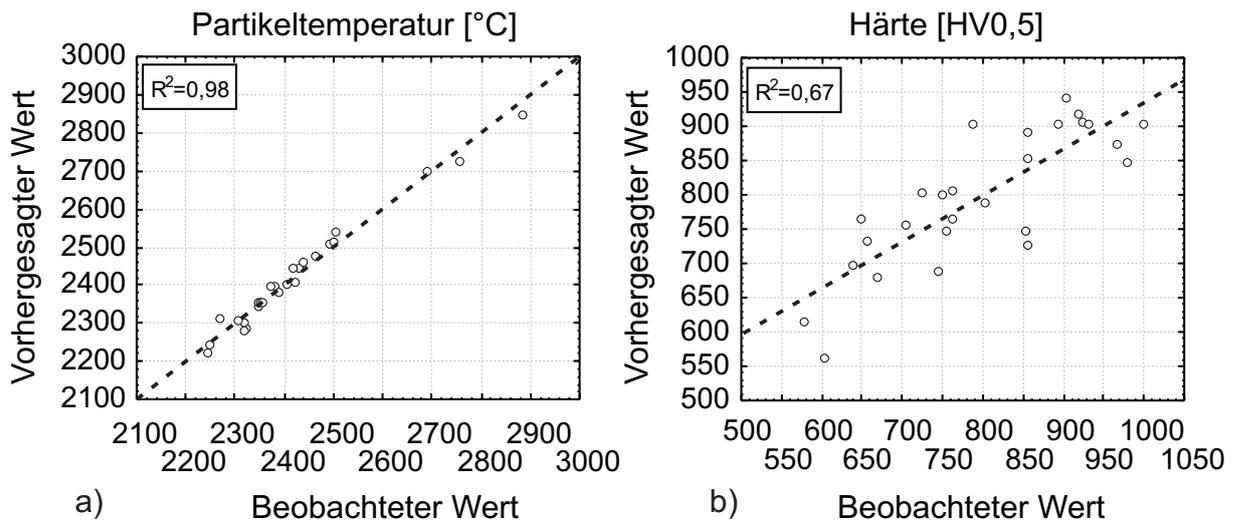


Abbildung 5.9: Evaluation der Modellierung der Schichteigenschaften durch Gegenüberstellung der vorhergesagten Werte und der beobachteten Werte für a) die Partikeltemperatur und b) die Porosität

Meßwert	Bestimmtheitsmaß R^2 (Güte des Modells)
Partikeltemperatur [°C]	0,98
Partikelgeschwindigkeit [m/s]	0,92
Porosität [%]	0,74
Rauheit R_z [μm]	0,92
Haftzugfestigkeit [MPa]	0,80
Spannung (200 μm) [MPa]	0,81
Auftragsrate [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$]	0,97
Anteil geschmolzener Karbide [%]	0,77
Härte [HV0,1]	0,75
Härte [HV0,5]	0,67

Tabelle 5.1: Ermittelte Bestimmtheitsmaße als Ergebnis der Gegenüberstellung der vorhergesagten und der beobachteten Werte für plasmagespritztes WC-12Co

ten zu erwarten. Es kann jedoch anhand der Bestimmtheitsmaße nicht davon ausgegangen werden, dass die Modelle falsche Aussagen liefern.

Zur Ermittlung eines globalen Optimums der verschiedenen Messwerte wurden die Regressionsmodelle mit Wünschbarkeitsfunktionen nach Kapitel 4.5.1.1 kombiniert. Dabei wurde die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Bei allen Meßgrößen wurde dem gemessenen Bestwert eine Wünschbarkeit von eins und dem schlechtesten gemessenen Wert eine Wünschbarkeit von null zugeordnet. Zwischen diesen Werten steigt die Wünschbarkeitsfunktion linear an. Zur Herstellung hochqualitativer Beschichtungen für den Verschleißschutz wurden die Schichteigenschaften Auftragsrate, Mikrohärtigkeit, Kleinlasthärtigkeit und Haftzugfestigkeit hinsichtlich eines Maxi-

Messwert	Vorhergesagter Wert	Beobachteter Wert
Auftragsrate [$\mu\text{m}/\ddot{\text{U}}\text{berlauf}$]	19,62	22,48
Porosität [%]	3,51	11,13
Rauheit R_z [μm]	40,66	34,19
Mikrohärte [$HV_{0,1}$]	1173,10	1168,2
Kleinlasthärte [$HV_{0,5}$]	922,37	747,96
Haftzugfestigkeit [Mpa]	53,50	-
Anteil geschmolzener Karbide [%]	51,38	56,25

Tabelle 5.2: Vorhergesagte und beobachtete Werte als Ergebnis des Central Composite Designs

Spritzparameter	Wert
Ar/H_2	9,08
Gasdurchsatz [l/min]	78,17
Pulverförderrate [g/min]	41,28
Spritzabstand [mm]	115,85

Tabelle 5.3: Optimierte Spritzparameter als Ergebnis des Central Composite Designs

malwertes und die Schichteigenschaften Porosität, Rauheit und Anteil an geschmolzenen Karbiden auf einen Minimalwert optimiert. Die daraus resultierenden Wünschbarkeitsfunktionen sind in Abbildung 5.10 exemplarisch für die Porosität dargestellt. Mit der globalen Optimierung konnte allerdings nur eine relativ geringe globale Wünschbarkeit von 0,59 erzielt werden, die eine Folge des zum Teil stark gegenläufigen Trends der einzelnen Schichteigenschaften ist.

Das Ergebnis der globalen Optimierung sind die optimierten Spritzparameter sowie eine Vorhersage der Schichteigenschaften am Optimalwert. Diese Werte sind in Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 aufgelistet. Am Optimum werden Schichten mit einer geringen Porosität sowie einer charakteristischen Auftragsrate, Mikro- und Kleinlasthärte, Haftzugfestigkeit und einem charakteristischen Anteil an geschmolzenen Karbiden prognostiziert. Diese Werte können für eine atmosphärisch plasmagespritzte WC-12Co Schicht für den Einsatz als Verschleißschutzschicht als optimal bewertet werden. Vergleichbare Eigenschaften werden auch in der Fachliteratur für optimierte WC-12Co Schichtsysteme angegeben [RJ89, KKC94, GV97].

Im Anschluß an die Schichtoptimierung wurden Evaluationsversuche durchgeführt, in denen Schichten mit den optimierten Prozessparametern hergestellt und anschließend deren Schichteigenschaften gemessen wurden. Durch eine Gegenüberstellung der experimentellen Werte und der theoretischen Daten wurde dann die Güte des theoretischen Modells überprüft. Die Ergebnisse dieser Versuche sind ebenfalls in Tabelle 5.2

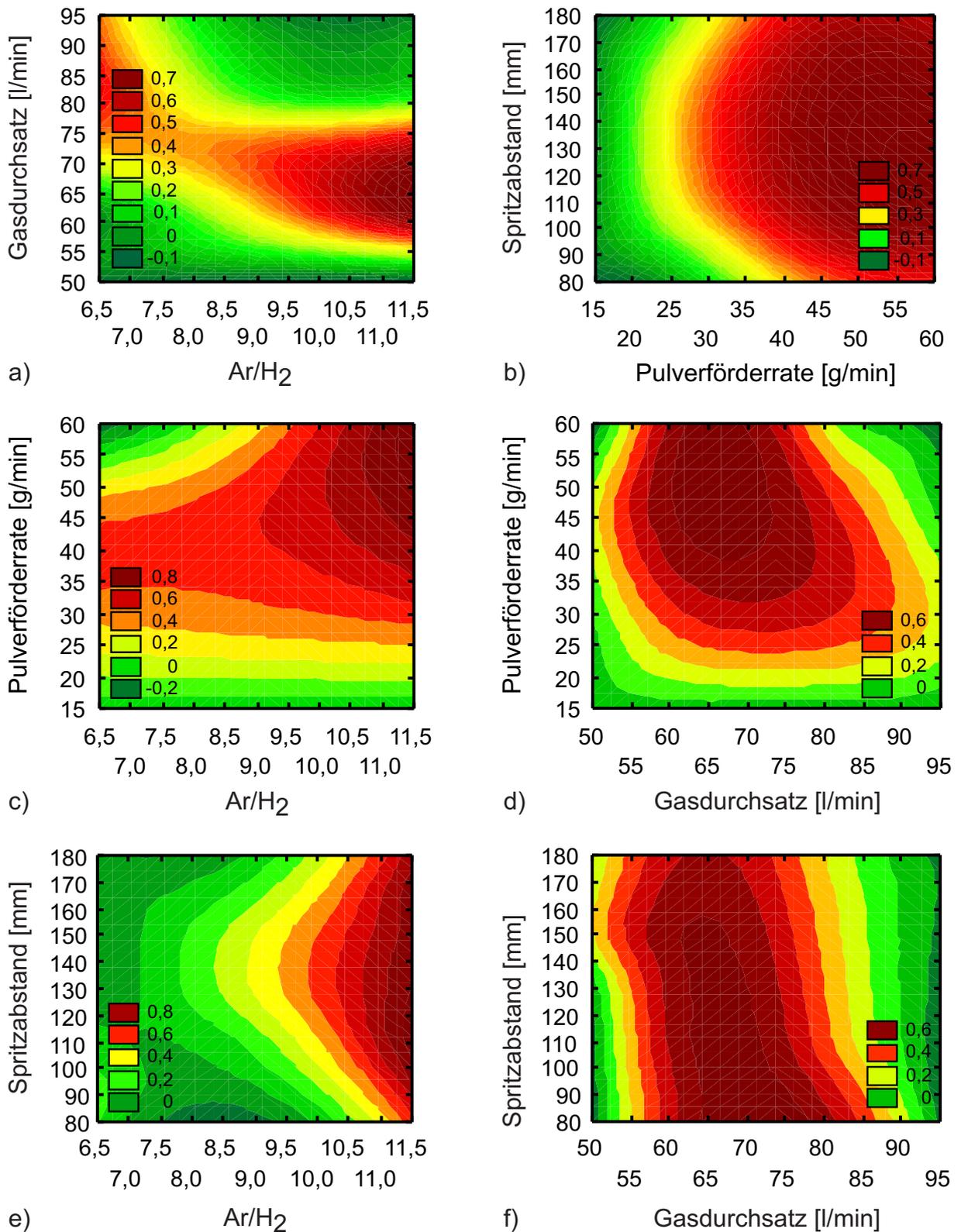


Abbildung 5.10: Konturdiagramme der Wünschbarkeitsfunktionen für die Porosität. Wünschbarkeit als Funktion a) des Gasdurchsatzes und des Verhältnis Ar/H_2 , b) des Spritzabstandes und der Pulverförderrate, c) der Pulverförderrate und des Verhältnisses Ar/H_2 , d) der Pulverförderrate und des Gasdurchsatzes, e) des Spritzabstandes und des Verhältnisses Ar/H_2 , f) des Spritzabstandes und des Gasdurchsatzes

dargestellt. Die beobachteten Werte der Evaluationsphase weisen eine recht gute Übereinstimmung mit den vorhergesagten Werten auf. Für die Auftragsrate, die Rauheit, die Mikrohärtigkeit und den Anteil geschmolzener Karbide wurden dem theoretischen Modell vergleichbare oder sogar bessere Werte an den Schichten gemessen. Lediglich für die Porosität und die Kleinlasthärtigkeit zeigen sich recht hohe Abweichungen zu den vorhergesagten Werten. Die hohe Porosität der Spritzschichten kann dabei auf die recht geringe Karbidzersetzung der optimierten Spritzschichten zurückgeführt werden. In der Fachliteratur wird berichtet, dass bei plasmagespritzten WC-12Co Schichten gegenläufige Trends zwischen der Karbidzersetzung und der Porosität auftreten [VL98]. Dieser Zusammenhang wird in den Regressionsmodellen bezogen auf den Gasdurchsatz zwar berücksichtigt, jedoch tritt in der Realität eine komplexere Wechselwirkung zwischen diesen Schichteigenschaften auf. Die höhere Porosität der Spritzschichten gegenüber den vorhergesagten Werten geht mit einem Abfall der Kleinlasthärtigkeit einher. Dies ist ein typisches Messartefakt bei der Kleinlasthärtigkeitsmessung von porösen Schichten. Bei porösen Schichtgefügen dringt der Indenter tiefer als bei dichten Schichten in das Schichtgefüge ein, wodurch zu geringe Härtewerte vorgetäuscht werden.

5.1.3 Fazit

Durch Einsatz eines Central Composite Designs in Verbindung mit dem Konzept der Wünschbarkeiten konnten WC-12Co Schichten für den Verschleißschutz optimiert werden. Nach der Optimierungsphase weisen die Schichten gute mikrostrukturelle und topographische Eigenschaften auf. In standardisierten Verschleißschutztests wurde zudem an den optimierten Schichten eine hohe Verschleißfestigkeit mit einer Verschleißrate $< 4\mu\text{g}/\text{kN}$ nachgewiesen [TNL10]. Auch die relativ hohe Porosität der Spritzschichten mindert die Verschleißfestigkeit der Schichten nicht. Besonders in Anwendungen, bei denen sehr geringe Reibwerte benötigt werden, können die offenen Poren der Beschichtung gezielt als Reservoir für Schmierstoffe genutzt werden.

5.2 Optimierung des Schichtsystems WSC-Fe

Zur Optimierung der lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten wurde der Einfluss der **Prozessparameter Primärgas, Sekundärgas, Spannung und Strom** auf die Eigenschaften der Spritzpartikel und das Schichtgefüge untersucht. Bei einer Variation dieser Parameter ist gemäß der Fachliteratur der größte Effekt in der Beschichtung zu erwarten [WHPG96, WHPG99, PMAC05, TVA07, WBJ08, TVA08a]. Es wurde ein klassischer

One-Factor-at-a-Time Versuchsplan angewendet, bei dem jeweils ein Spritzparameter unter Konstanthaltung der anderen Prozessparameter untersucht wurde. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Versuchsreihen vorgestellt. Dabei werden zunächst die Ergebnisse der Prozessparameterstudien einzeln diskutiert und anschließend auf Grundlage der Ergebnisse die optimierten Spritzprozessparameter definiert¹.

5.2.1 Primärgas

Das Primärgas dient zur Zerstäubung der Metallschmelze im Lichtbogenspritzprozess. Es wird im Spritzprozess axial in den Lichtbogenbrenner eingedüst und trifft dabei mittig auf die schmelzflüssigen Drahtenden. Diese werden durch den Gasstrom abgerissen, zerstäubt und beschleunigt. Eine genaue Erklärung und eine Prinzipskizze des Primärgases findet sich in Kapitel 2.2.2.

Im Spritzprozess kann ein Primärgasdruck von bis zu 6 bar eingestellt werden. Eine Erhöhung des Primärgasdruckes bewirkt dabei einen Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit des Primärgases, wodurch die zerstäubten Spritzpartikel auf höhere Partikelgeschwindigkeiten beschleunigt werden. Dies ist in Abbildung 5.11a ersichtlich. Die Geschwindigkeit der Spritzpartikel verdoppelt sich annähernd bei einer Erhöhung des Primärgasdruckes von 2 bar auf 4 bar. Zwischen einem Primärgasdruck von 4 bar und 6 bar tritt jedoch nur noch ein Anstieg der Partikelgeschwindigkeit um 20 % bis 25 % auf. Durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit bei einem höheren Gasdruck verlieren die Spritzpartikel durch Konvektion thermische Energie an die Umgebungsluft, was einen geringfügigen Abfall der Partikeltemperatur um knapp 2 % zur Folge hat (Abbildung 5.11b).

Die Änderungen der Partikelgeschwindigkeit und -temperatur bei einer Erhöhung des Primärgasdruckes spiegeln sich deutlich in den Schichteigenschaften wieder. Bei einem geringen Primärgasdruck werden überwiegend große Tropfen von den aufgeschmolzenen Spritzdrähten abgelöst und nur wenig zerstäubt [TVN09]. Diese treffen mit einer geringen kinetischen Energie auf das Substrat auf und bilden Schichten mit einer groben Schichtstruktur und zahlreichen großen, runden Partikeln im Schichtgefüge. Mit zunehmendem Zerstäubergasdruck steigt die kinetische Energie der Spritzpartikel an und parallel dazu nimmt der Durchmesser der Spritzteilchen ab [PMAC05, TVA07, WBJ08]. Durch ihre nun größere spezifische Oberfläche oxidieren

¹Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse sind zum Teil in einer Projektarbeit von den Herren Dipl.-Wirt.-Ing. Hendrik Schleining und Dipl.-Wirt.-Ing. Eduard Essert entstanden, die im Rahmen dieser Dissertation betreut wurde [SE08].

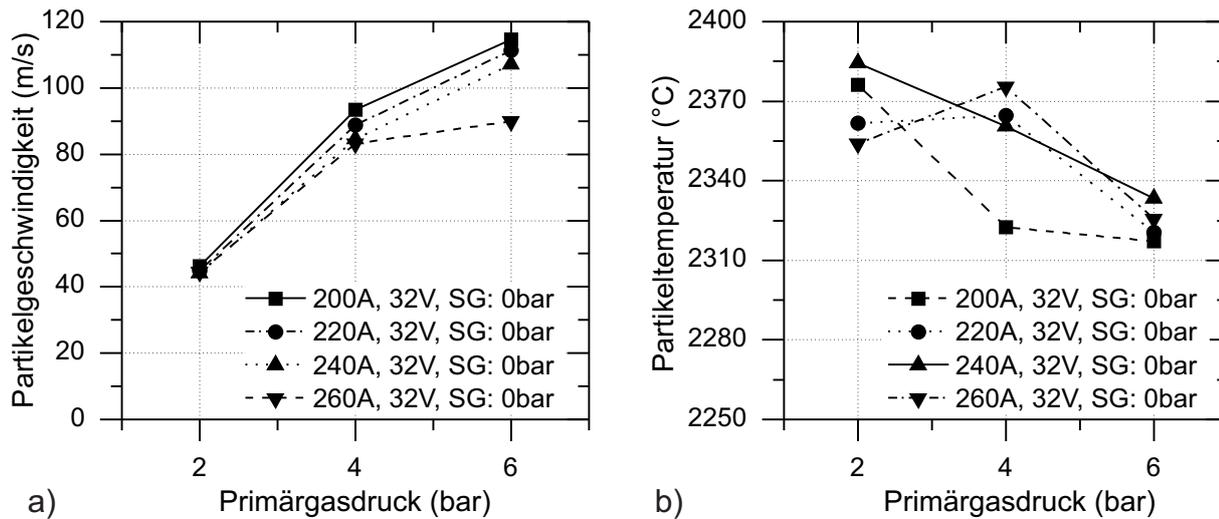


Abbildung 5.11: a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Primärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe

diese Teilchen verstärkt, wodurch ihre Viskosität ansteigt [WHPG99, BBJC01, PLC04]. Beim Aufprall auf das Substrat flachen die Teilchen stärker ab und es bilden sich dichte und glatte Schichten [GV03, PLC04, GV06]. Dieser Sachverhalt wird durch die Messungen der Rauheit und der Porosität in Abbildung 5.12 verdeutlicht. Bei einer Erhöhung des Primärgasdruckes von 2 bar auf 4 bar tritt ein signifikanter Abfall der Schichtrauheit um bis zu 32% und der Schichtporosität um bis zu 8,6% auf, der oberhalb von 4 bar abflacht. Hier ändert sich die Schichtrauheit nur noch um bis zu 20% und die Schichtporosität um bis zu 1,9%. Die lichtmikroskopischen Aufnahmen an Querschliffen in Abbildung 5.13 spiegeln ebenfalls diesen Trend wieder. Bei 2 bar zeigt sich ein grober Schichtaufbau mit zahlreichen Poren, grauen oxidischen Phasen und horizontalen Rissen im Schichtgefüge. Eine Erhöhung des Zerstäubergasdruckes bewirkt eine sichtliche Homogenisierung des Schichtgefüges. Bei 4 bar weisen die Schichten bereits eine deutlich kompaktere Schichtstruktur mit abgeplatteten und dicht verbundenen Schichtlamellen auf. Dieser Effekt verstärkt sich nochmals bis 6 bar. Allerdings zeigt sich auch, dass mit zunehmendem Gasdruck der Anteil an oxidischen Phasen im Schichtgefüge ansteigt.

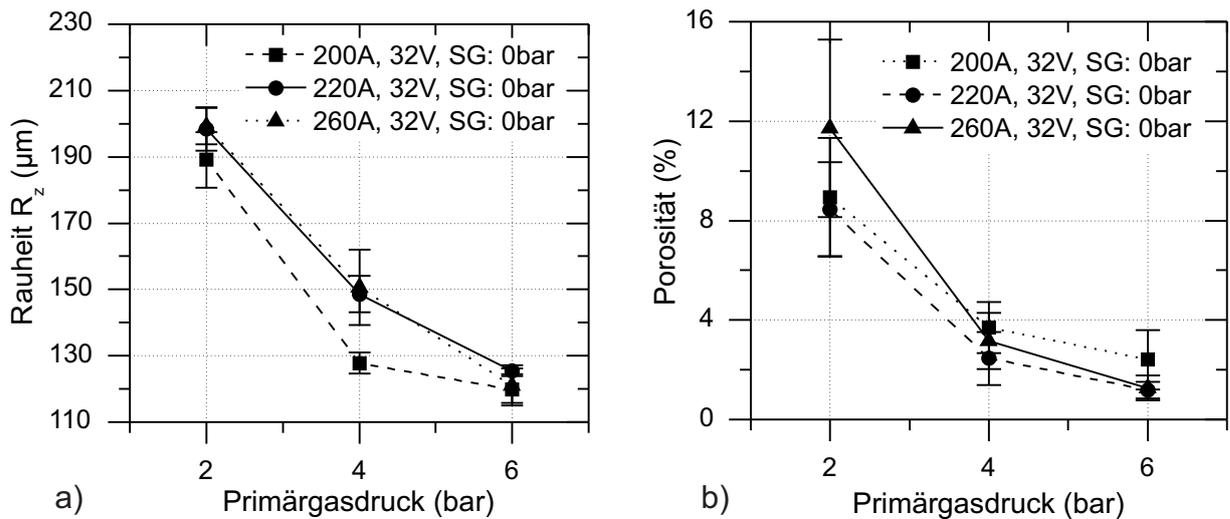


Abbildung 5.12: a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion des Primärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe

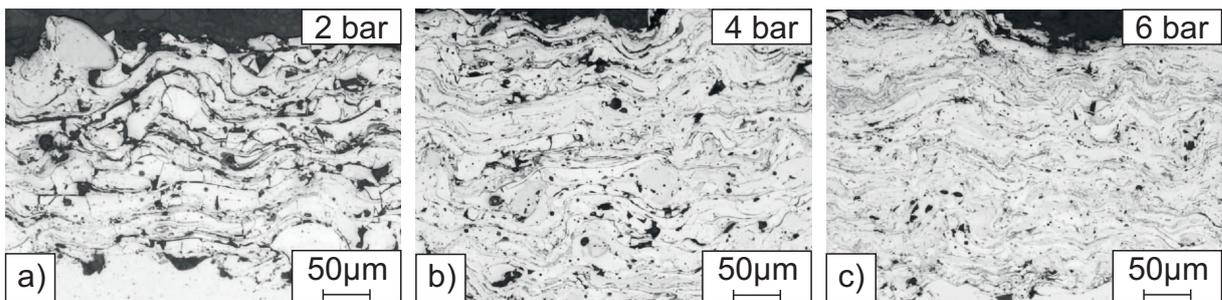


Abbildung 5.13: Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 2 bar, b) 4 bar und c) 6 bar Primärgasdruck hergestellt wurden ($I = 200 \text{ A}$, $U = 32 \text{ V}$, $SG = 0 \text{ bar}$)

Eine Erhöhung des Primärgasdruckes hat ebenfalls einen Anstieg der Auftragsrate zur Folge (Abbildung 5.14). Die höhere kinetische Energie der Spritzpartikel, sowie eine stärkere Fokussierung des Spritzstrahls vermindert den Verlust an Spritzgut durch Overspray [BML06]. Dieser Effekt ist besonders signifikant zwischen 2 bar und 4 bar, wo ein deutlicher Anstieg der Auftragsrate um bis zu 18 % auftritt. Oberhalb von 4 bar ändert sich die Auftragsrate nur noch geringfügig. Zum Teil wird ein geringer Abfall der Auftragsrate um bis zu 5 % beobachtet, der auf ein verstärktes Zurückprallen erstarrter Spritzteilchen zurückzuführen ist.

Insgesamt weisen die Schichten, die mit einem hohen Primärgasdruck hergestellt wurden, die vielversprechendste Schichtmorphologie und -topographie auf. Mit zunehmendem Primärgasdruck bilden sich kleinere, hochkinetischere Spritzpartikel, die beim Aufprall auf das Substrat eine homogene Schicht mit einer geringen Porosität und Rau-

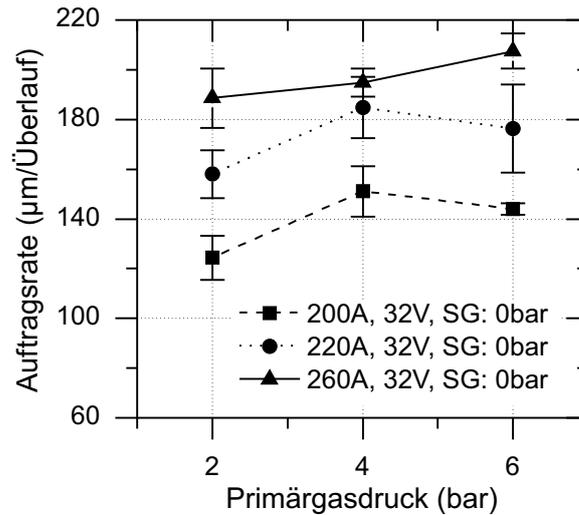


Abbildung 5.14: Auftrag rate als Funktion des Primärgasdruckes für das Schichtsystem WSC-Fe

heit bilden. Der Primärgasdruck von 6 bar erweist sich als optimal und wird daher in den nachfolgenden Versuchen nicht mehr variiert.

5.2.2 Sekundärgas

Eine weitere Verbesserung der Schichtmorphologie kann durch den Einsatz einer Sekundärgasdüse erzielt werden. Das Sekundärgas wird radial hinter der Primärzerstäubung in den Spritzstrahl eingedüst und bewirkt eine Fokussierung und Stabilisierung des Spritzstrahls (vgl. Kapitel 2.2.2). In der Fachliteratur wird mehrfach berichtet, dass durch den Einsatz einer Sekundärgasdüse feinere Spritzpartikel mit einer gleichmäßigeren Korngrößenverteilung hergestellt werden können, die sich zudem auf höhere Geschwindigkeiten beschleunigen lassen [WHPG96, WHPG99, PMAC05].

Dieser Zusammenhang kann anhand der Messungen der Partikelgeschwindigkeit und -temperatur bei einer Variation des Sekundärgasdrucks bestätigt werden. Abbildung 5.15a zeigt, dass bei 2 bar Sekundärgasdruck die Partikelgeschwindigkeit zunächst abfällt. Der radiale Sekundärgasstrom führt hierbei zu Turbulenzen im axialen Primärgasstrom, wodurch die Beschleunigungsphase der Spritzteilchen gestört wird. Dieser Effekt wird allerdings bis zu einem Sekundärgasdruck von 4 bar aufgehoben. Hier weisen die Spritzpartikel die höchste Geschwindigkeit bei dem Einsatz von Sekundärgas auf. Oberhalb von 4 bar ändert sich die Partikelgeschwindigkeit nicht mehr signifikant, da turbulente Querströmungen den positiven Einfluss des Sekundärgases vermindern. Aufgrund der Bildung von feinen Spritzpartikeln durch die Sekundärgaszerstäubung steigt hingegen die Partikeltemperatur über den gesamten Meßbereich geringfügig an

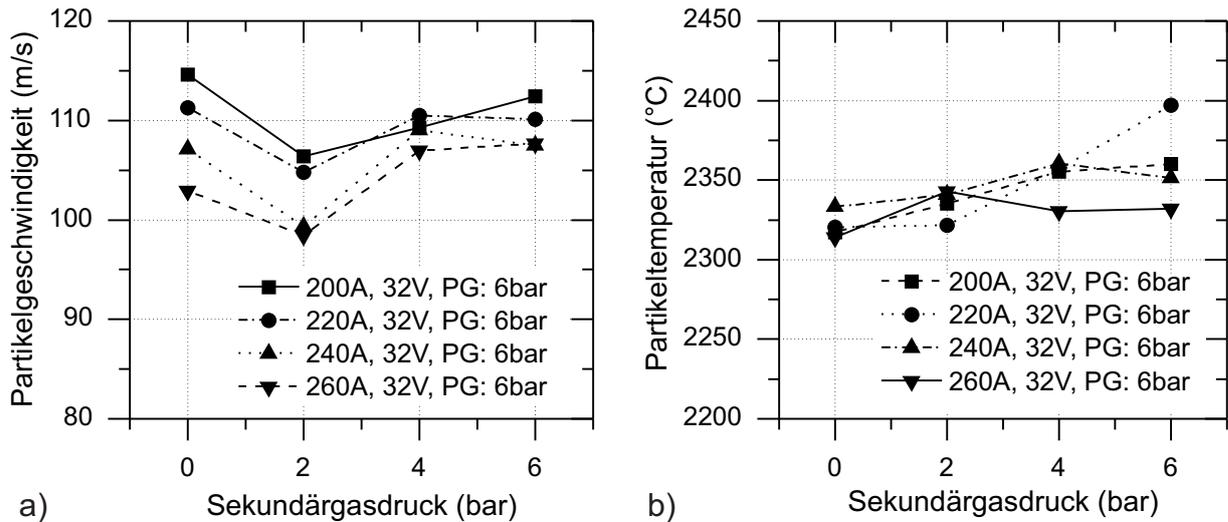


Abbildung 5.15: a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Sekundärgases und des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten

(Abbildung 5.15b). Die Ursache dafür ist, dass diese feinen Spritzpartikel eine größere spezifische Oberfläche aufweisen und daher im Mittel mehr Wärme abstrahlen.

Die Änderungen der Spritzpartikeleigenschaften, bei einer Erhöhung des Sekundärgasdruckes, haben einen wesentlichen Einfluss auf das resultierende Schichtgefüge. In Abbildung 5.16 sind Rauheit und Porosität der Spritzschichten dargestellt. Die Schichtrauheit fällt deutlich bei einer Erhöhung des Sekundärgases ab. Die immer feiner werdenden Spritzteilchen deformieren beim Aufprall auf das Substrat stark [WHPG99], flachen ab und bewirken dadurch eine Homogenisierung des Schichtgefüges, die sich bis zu der Schichtoberfläche hindurchsetzt. Die ohnehin bereits niedrige Porosität der Spritzschichten unterhalb von 3 % wird hierdurch nicht weiter positiv beeinflusst.

Die zunehmende Homogenisierung des Schichtgefüges bei einer Erhöhung des Sekundärgasdruckes lässt sich ebenfalls in den lichtmikroskopischen Aufnahmen der Querschliffe erkennen (Abbildung 5.17). Bis zu einem Sekundärgasdruck von 4 bar bilden sich immer feinere Lamellen, die in einem gleichmäßigeren Schichtgefüge resultieren. Oberhalb von 4 bar wird das Schichtgefüge allerdings wieder gröber, wodurch sich die Anbindung zum Substrat verschlechtert. Die Ursache hierfür sind Turbulenzen im Spritzstrahl. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch von Wang et al. ermittelt [WHPG95].

Eine Erhöhung des Sekundärgasdruckes bewirkt ebenfalls einen Anstieg der Auftragsrate (Abbildung 5.18). Insbesondere bis 4 bar steigt diese signifikant um bis zu 20 % an. Der Spritzprozess wird dadurch effizienter, da ein immer größerer Anteil des Spritzzusatzes eine Schicht bildet. Jedoch stagniert der Verlauf oberhalb von 4 bar.

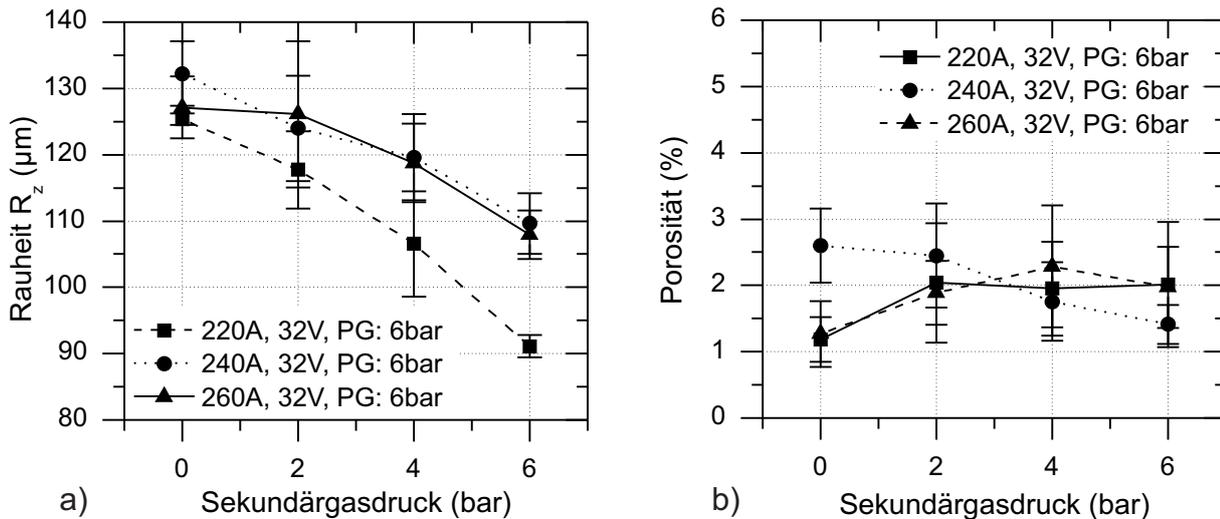


Abbildung 5.16: a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion des Sekundärgasdruckes für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe

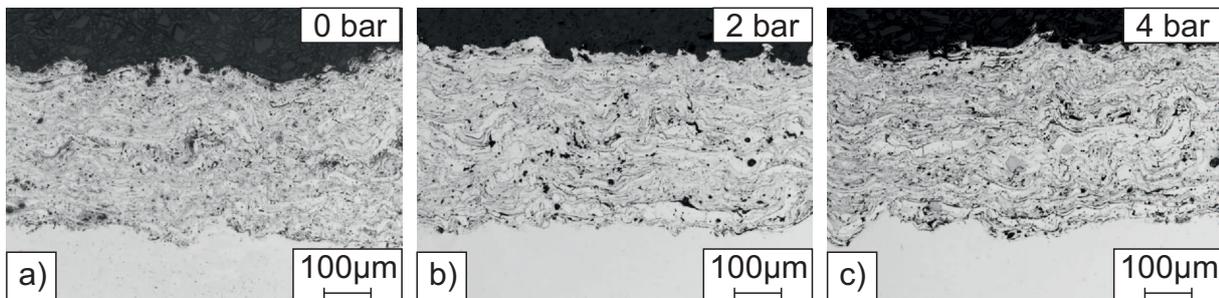


Abbildung 5.17: Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 0 bar, b) 2 bar und c) 4 bar Sekundärgasdruck hergestellt wurden ($I = 220$ A, $U = 32$ V, $PG = 6$ bar)

Die Untersuchungen des Einflusses des Sekundärgasdruckes zeigen, dass sich bei einer Erhöhung des Sekundärgasdruckes bis 4 bar die Schichteigenschaften deutlich verbessern, während oberhalb dieses Werts Turbulenzen auftreten. Somit ist ein Sekundärgasdruck von 4 bar optimal für die Herstellung qualitativ hochwertiger Schichten. Für die Beschichtung komplexer Oberflächen ist es darüberhinaus wichtig, dass der Spritzstrahl einen kleinen Öffnungswinkel aufweist, um Overspray zu minimieren und besonders bei der Beschichtung kleiner Winkel oder Radien eine konturgenaue Schicht zu ermöglichen. Zur Überprüfung dieses Sachverhalts wurden Aufnahmen des Spritzstrahls ohne Sekundärgas und mit 4 bar Sekundärgasdruck gemacht. Diese sind in Abbildung 5.19 dargestellt. Durch das Sekundärgas am Optimalwert kann eine Fokussierung des Spritzstrahls um $1,5^\circ$ erzielt werden. Der Öffnungswinkel von $11,8^\circ$ ist allerdings im Vergleich zu anderen Spritzverfahren nach wie vor recht hoch und stellt eine Limitierung des Lichtbogenprozesses bei der Beschichtung komplexer Oberflächen dar.

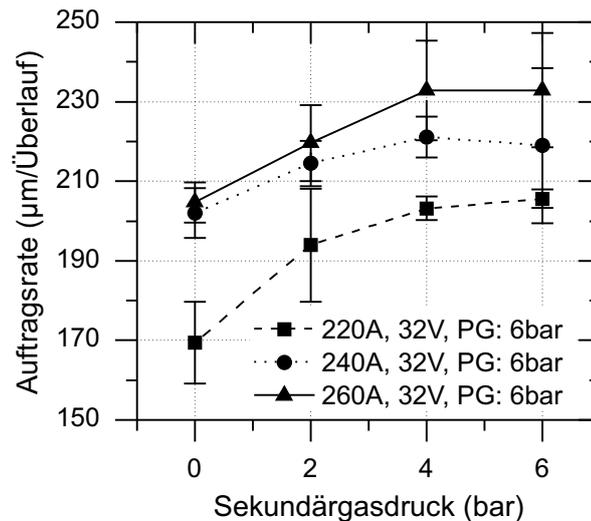


Abbildung 5.18: Auftragrate als Funktion des Sekundärgasdruckes für das lichtbogen-gespritzte Schichtsystem WSC-Fe

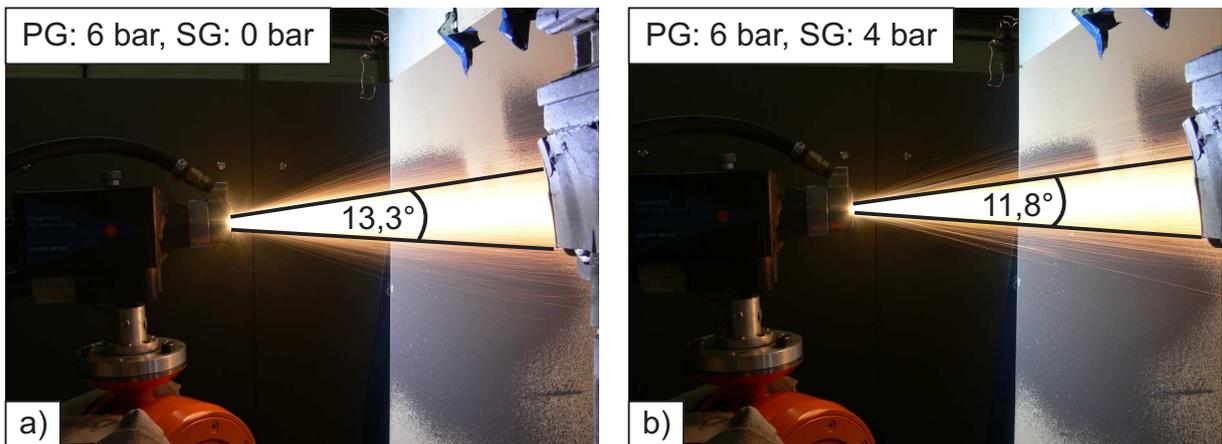


Abbildung 5.19: Einschnürung des Spritzstrahls durch Einsatz des Sekundärgases

5.2.3 Spannung

Die Spannung ist eine wichtige Kenngröße für den Aufbau des Lichtbogens. Mit steigender Prozessspannung steigt die Intensität des Lichtbogens. Dadurch wird der Spritzprozess zum einen stabiler und damit robuster gegenüber Störeinflüssen, zum anderen steigt aber auch der thermische Energieeintrag in den Spritzzusatz an. Das kann insbesondere bei karbidischen Spritzzusätzen zu unerwünschten thermischen Zersetzungen der Karbide führen [SDW90]. Weiterhin wird in der Fachliteratur darauf verwiesen, dass sich bei höheren Spannungen größere Spritzpartikel bilden [TVA08a, PAM04, PMAC05]. Diese resultieren aus einer größeren Lichtbogenlänge, durch die sich ein größeres Schmelzbad mit einer höheren Viskosität an den Drahtenden ausbildet [WBJ08]. Dieses viskose Schmelzbad lässt sich durch das Gas schlechter zerstäuben

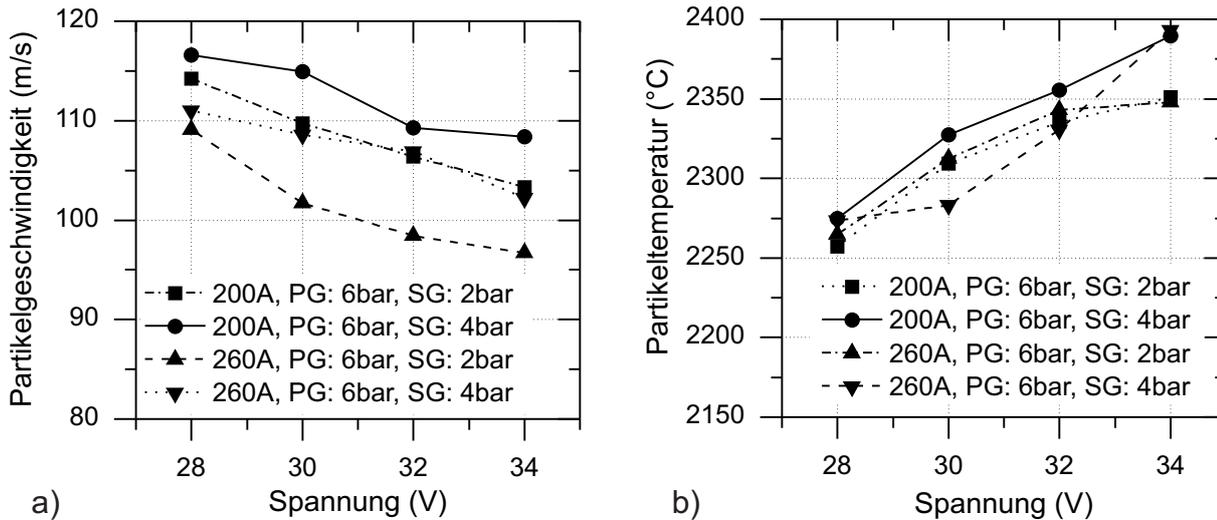


Abbildung 5.20: a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion der Spannung für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten

und es entstehen daher größere Spritzpartikel.

Die größeren Spritzpartikel haben jedoch eine höhere träge Masse als feine Partikel und werden daher durch das Zerstäubergas nur auf geringere Partikelgeschwindigkeiten beschleunigt. Dies führt zu einem Absinken der Partikelgeschwindigkeit bei einer Erhöhung der Spannung (Abbildung 5.20a). Gleichzeitig steigt die thermische Energie der Spritzpartikel an, da die höhere elektrische Leistung des Lichtbogens, bei höheren Spannungen, in der Drahtschmelze in mehr Wärme umgewandelt wird. Dies wiederum hat einen Anstieg der Partikeltemperatur zur Folge (Abbildung 5.20a). Hohe Partikeltemperaturen sind bei der Schichtbildung unvorteilhaft, da sie zu ausgeprägten Eigenspannungen in der Beschichtung führen, durch die eine Schichtdelamination auftreten kann.

Trotz der geänderten Spritzpartikeleigenschaften wird die Rauheit und die Porosität der Beschichtung nicht signifikant durch die Spannung beeinflusst. Abbildung 5.21 zeigt einen annähernd konstanten Verlauf beider Schichteigenschaften bei einer Veränderung der Spannung. Allerdings zeigte sich in den Versuchen, dass bei 28 V der Lichtbogen instabil wird, wodurch sogar der Beschichtungsprozess zum Teil abbrach. Auch der vom Trend abweichende Rauheitswert bei 28 V, 260 A, PG: 6 bar und SG: 2 bar kann auf einen instabilen Spritzprozess zurückgeführt werden. In lichtmikroskopischen Aufnahmen an Querschliffen zeigte sich zudem, dass bei 28 V die Schichten Risse im Gefüge, sowie eine schlechte Anbindung zum Substrat, aufweisen (Abbildung 5.22a). Oberhalb von 28 V zeigen die Schichten dagegen eine dichte und homogene Mikrostruktur, wobei das Schichtgefüge mit zunehmender Spannung immer größer wird. Das ist ein Resultat der größeren Spritzpartikel bei höheren Spannungen, die

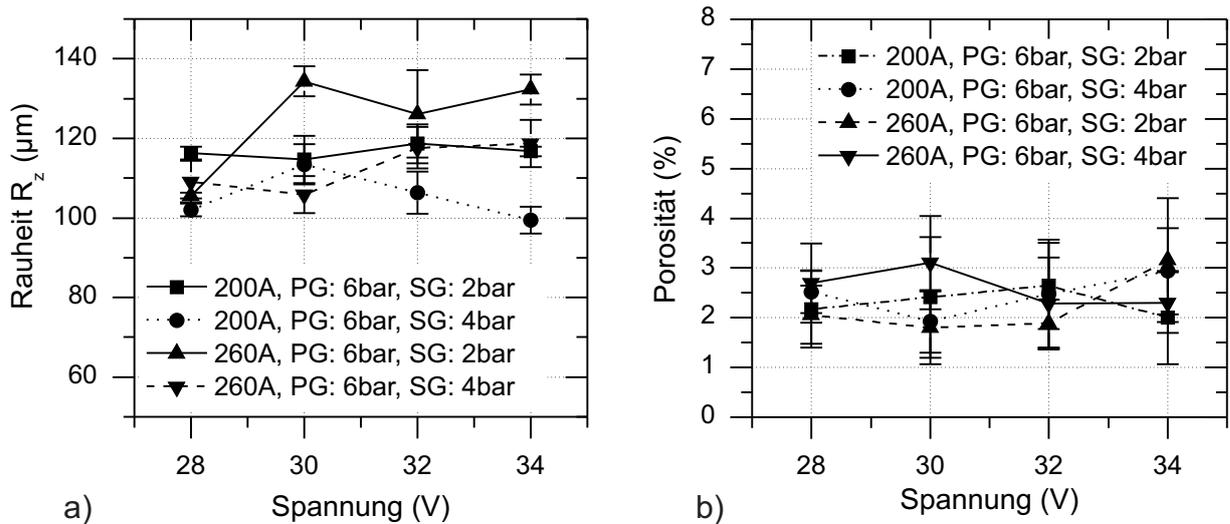


Abbildung 5.21: a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion der Spannung für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten

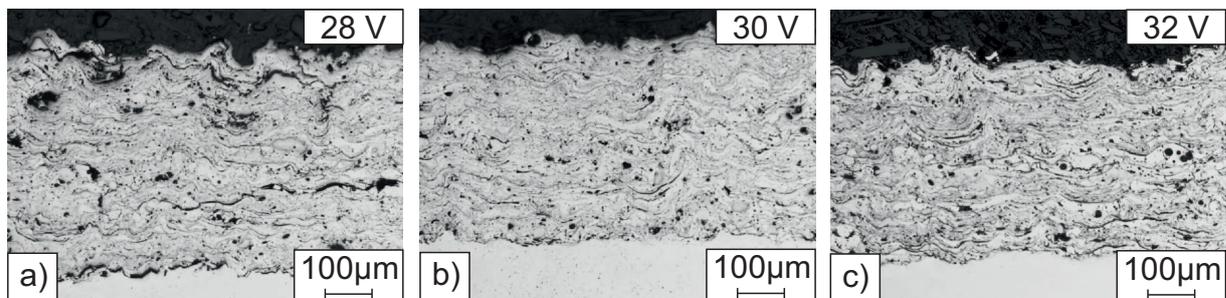


Abbildung 5.22: Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 28 V, b) 30 V und c) 32 V Spannung hergestellt wurden ($I = 260 \text{ A}$, $PG = 6 \text{ bar}$, $SG = 4 \text{ bar}$)

aufgrund ihrer hohen Viskosität beim Aufprall nur geringfügig abflachen.

Eine Erhöhung der Spannung bewirkt zudem, dass die Spritzteilchen bei ihrer Zerstäubung eine radiale Geschwindigkeitskomponente erhalten, die eine Aufweitung des Spritzstrahls bewirkt [BML06]. Das führt dazu, dass vermehrt Spritzzusatz in Form von Overspray verloren geht. Dieser Trend zeigt sich in Abbildung 5.23, wo mit zunehmender Spannung die Auftragsrate absinkt. Besonders bei der Beschichtung komplexer Oberflächen muss dieser Sachverhalt berücksichtigt werden, da ein großer Öffnungswinkel unvorteilhaft zur Erzielung einer endkonturnahen Beschichtung ist.

Abschließend lässt sich zusammenfassen, dass beim Lichtbogenspritzen mit WSC-Fe hohe Spannungen zu vermeiden sind, da diese zu großen Partikeln im Spritzstrahl und einem Anstieg der Spritzpartikeltemperatur sowie einer Aufweitung des Spritzstrahls führen. Bei Verwendung von zu niedrigen Spannungen brennt der Lichtbogen dagegen unregelmäßig und der Spritzprozess wird instabil, was sich in der Schichtmorphologie niederschlägt. Zu bevorzugen sind daher möglichst niedrige Spannungen.

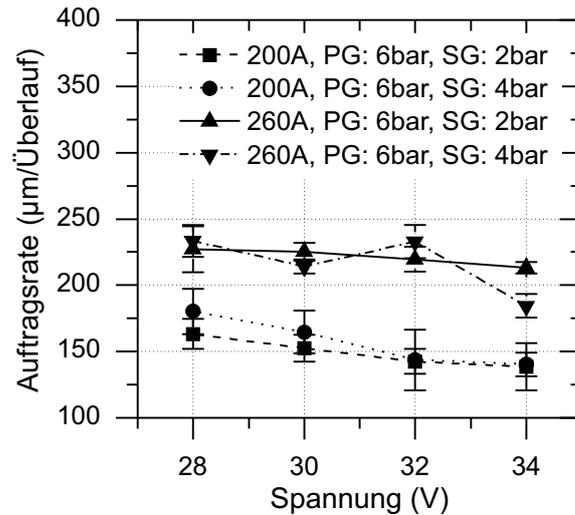


Abbildung 5.23: Auftragsrate als Funktion der Spannung für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten

gen, bei denen dennoch ein gleichmäßiger und konstanter Lichtbogen gewährleistet werden kann. Als optimal erweist sich bei dem Schichtsystem WSC-Fe eine Spannung von 30 V. Hierbei brennt der Lichtbogen stabil und es bilden sich Schichten mit einer feinstrukturierten, dichten und homogenen Mikrostruktur aus.

5.2.4 Strom

Der Strom hat einen deutlichen Einfluss auf die Charakteristik der Spritzpartikel und damit auf den Aufbau der thermischen Spritzschicht. Geregelt wird der Strom im Lichtbogenspritzprozess über die Fördergeschwindigkeit der Spritzdrähte. Eine Erhöhung der Drahtfördergeschwindigkeit bewirkt, dass sich die unter Spannung liegenden Drahtenden stärker annähern [PMAC05]. Als Folge dessen sinkt der Widerstand zwischen den Drahtenden ab und es fließt ein höherer Strom. Durch eine Erhöhung des Stroms kann daher die Förderrate des Spritzzusatzes und damit die Effizienz des Spritzprozesses gesteigert werden. Dafür müssen allerdings einige Randbedingungen erfüllt werden. Abbildung 5.24a zeigt, dass die Partikelgeschwindigkeit bei höheren Stromstärken absinkt. Dies wird dadurch verursacht, dass bei einer höheren Stromstärke ein größeres Schmelzbad an den Drahtenden entsteht und dieses durch denselben Gasstrom beschleunigt werden muss [WBJ08]. Zudem wird in der Fachliteratur berichtet, dass die mittlere Partikelgröße mit der Stromstärke ansteigt und sich die größeren Partikel, aufgrund ihrer höheren trägen Masse, schlechter beschleunigen lassen [BML06]. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 5.24b, dass sich die Partikeltemperatur bei einer Erhöhung des Stroms nur geringfügig ändert. Dies liegt in der Tatsache

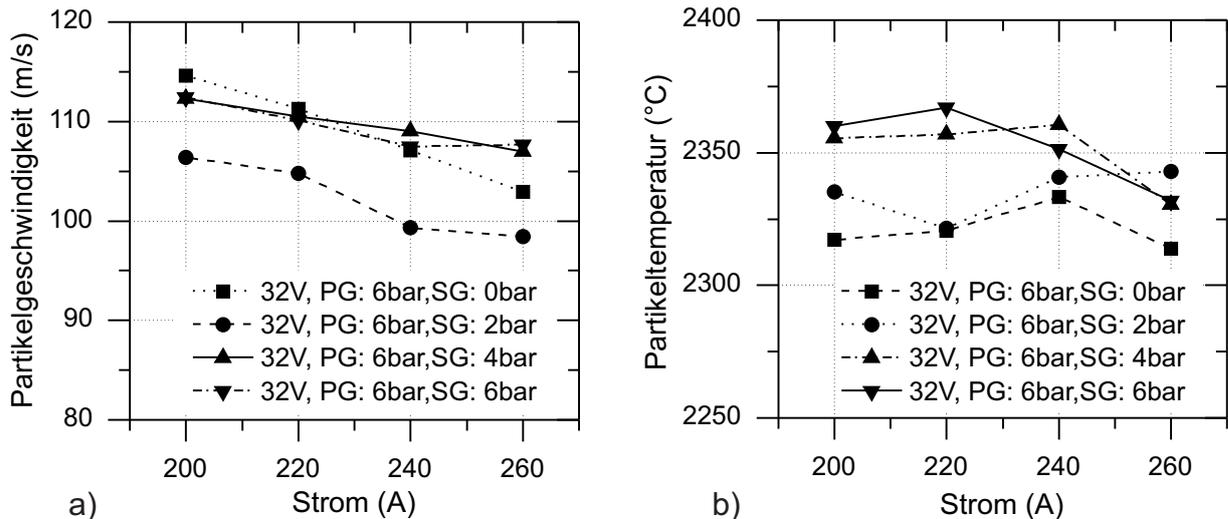


Abbildung 5.24: a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten

begründet, dass bei höheren Stromstärken mehr Draht gefördert wird. Die elektrische Leistung verteilt sich auf eine größere Menge Spritzzusatz, wodurch sich die Temperatur jedes einzelnen Spritzteilchens nur unwesentlich ändert. Dieser Zusammenhang wird ebenfalls in den Veröffentlichungen von Tillmann et al. [TVA08a] und Hale et al. [HSH98] dargestellt.

Eine höhere Stromstärke hat zudem eine Änderung der Schichtrauheit und -porosität zur Folge. Abbildung 5.25a zeigt, dass mit zunehmendem Strom die Rauheit der Spritzschichten, insbesondere zwischen 220 A und 240 A, um maximal 12 % ansteigt. Dies kann auf die Ausbildung größerer Spritzpartikel bei höheren Stromstärken zurückgeführt werden. Die Schichtporosität sinkt dagegen zwischen 200 A und 240 A geringfügig um maximal 1,1 % ab, während oberhalb von 240 A ein erneutes Ansteigen der Porosität zu beobachten ist (Abbildung 5.25b). Bei allen Stromstärken weisen die Schichten allerdings geringe Porositäten < 2,8 % auf und sind für einen Lichtbogenspritzprozess daher als dicht zu bewerten.

Dies zeigt sich auch in lichtmikroskopischen Aufnahmen an Querschliffen. Bei allen Stromstärken lässt sich das dichte, homogene Schichtgefüge der WSC-Fe Spritzschichten erkennen (Abbildung 5.26). Zwischen 200 A und 220 A werden keine signifikanten Änderungen der Mikrostruktur beobachtet, wohingegen oberhalb von 240 A Risse und Schichtausbrüche in der Beschichtung auftreten, die auf thermische Eigenspannungen zurückzuführen sind.

Diese thermischen Eigenspannungen werden durch einen stärkeren Wärmestrom zu der Substratoberfläche bei einer Erhöhung der Stromstärke verursacht. Bei höheren

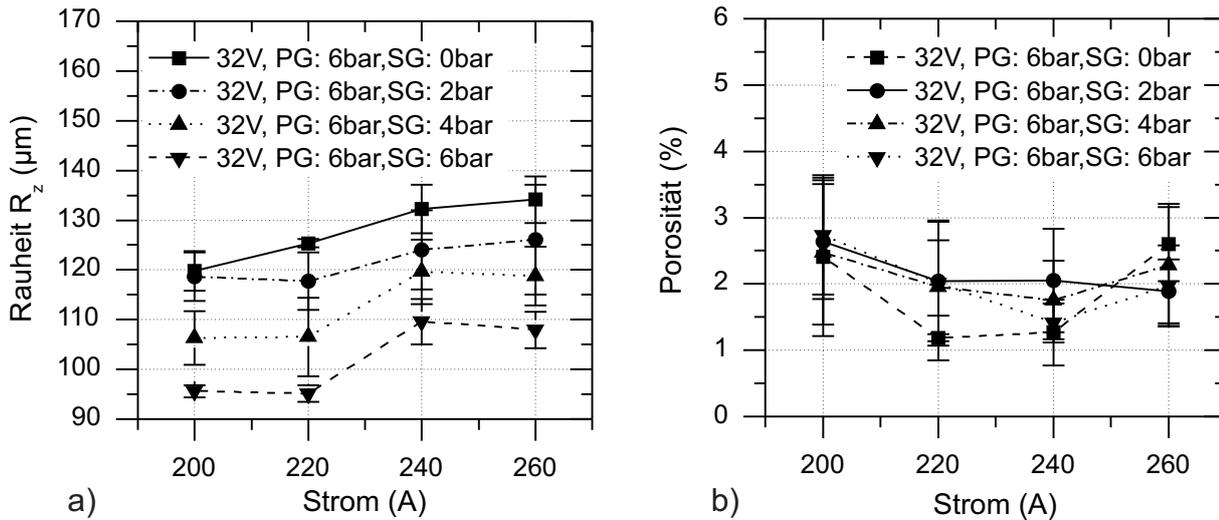


Abbildung 5.25: a) Rauheit R_z und b) Porosität als Funktion des Stroms für lichtbogen-gespritzte WSC-Fe Schichten

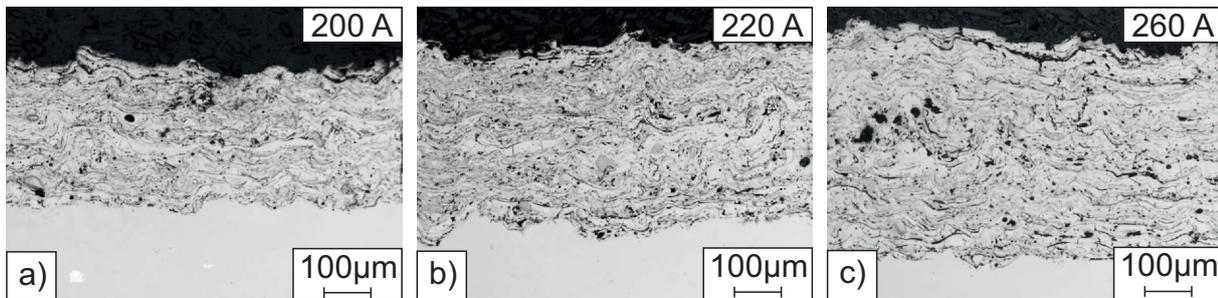


Abbildung 5.26: Lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Schichten die mit a) 200 A, b) 220 A und c) 260 A Strom hergestellt wurden ($U = 32 \text{ V}$, $PG = 6 \text{ bar}$, $SG = 4 \text{ bar}$)

Stromstärken wird mehr Draht gefördert, wodurch pro Zeiteinheit mehr Spritzpartikel auf die Substratoberfläche auftreffen und die Auftragsrate ansteigt (Abbildung 5.27a). Parallel zu der Auftragsrate steigt auch die in die Substratoberfläche eingebrachte Wärmemenge an, wodurch sich die Substrattemperatur erhöht (Abbildung 5.27b). Bei der anschließenden Abkühlung werden thermische Eigenspannungen in dem Verbund Substrat-Beschichtung frei, die proportional zur Substrattemperatur ansteigen. Bei hohen Stromstärken und daher hohen Substrattemperaturen kann dies zu einer Delamination der Beschichtung führen. In dem untersuchten Intervall bis 260 A Stromstärke wurde allerdings keine Schichtdelamination beobachtet.

Anhand der Ergebnisse erweist sich eine Stromstärke von 220 A als optimal, um dichte Schichten mit einer geringen Rauheit und einer gleichmäßigen Mikrostruktur herzustellen. Auch lässt sich hierbei eine noch relativ hohe Auftragsrate realisieren. Der Einsatz einer mittleren Stromstärke im Lichtbogenspritzprozess wird zudem in der Fachliteratur empfohlen [HH01].

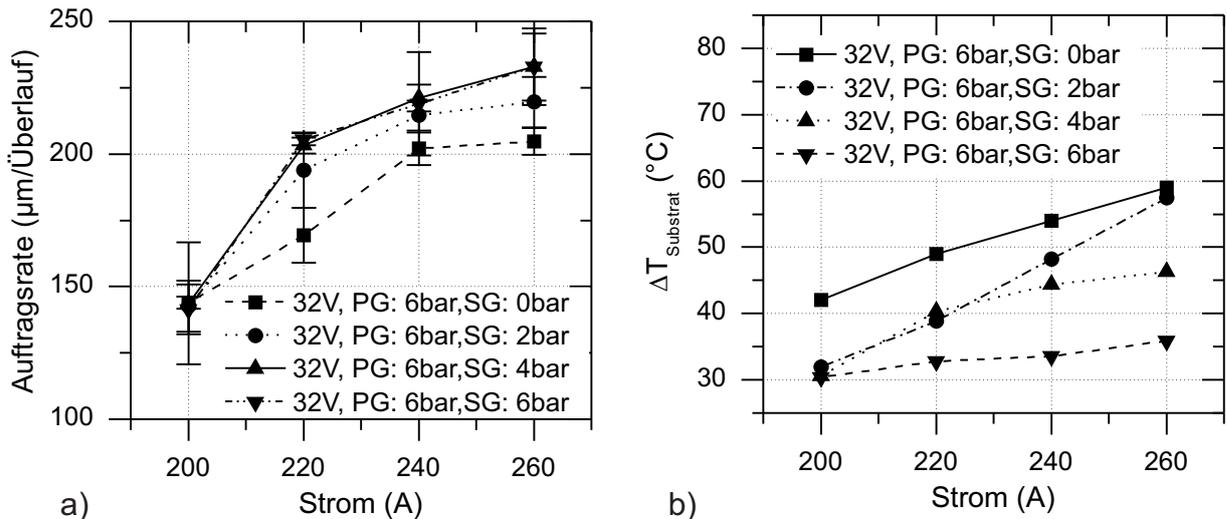


Abbildung 5.27: a) Auftragsrate und b) Anstieg der Substrattemperatur in einem Beschichtungsvorgang $\Delta T_{\text{Substrat}}$ als Funktion des Stroms für lichtbogengespritzte WSC-Fe Schichten

5.2.5 Fazit

Die Ergebnisauswertungen der Parameterstudien des Schichtsystems WSC-Fe zeigen, dass alle vier untersuchten Prozessparameter einen signifikanten Einfluss auf die Schichtqualität haben. Insbesondere das Primär- und das Sekundärgas beeinflussen weitreichend die Schichteigenschaften. Für das Primärgas gilt dabei, dass die Schichten eine umso feinere Struktur aufweisen, je höher der Primärgasdruck ist. Hingegen führt beim Sekundärgas ein mittlerer Druck zu den besten Schichteigenschaften. Ein zu niedriger oder ein zu hoher Sekundärgasdruck bewirkt dagegen Turbulenzen im Spritzstrahl, die das Beschichtungsergebnis negativ beeinflussen. Die Spannung sollte generell recht niedrig gewählt werden, da hohe Spannungen zu groben Spritzpartikeln führen und den Spritzstrahl aufweiten. Allerdings muss beachtet werden, dass bei zu niedrigen Spannungen der Lichtbogen instabil wird. Die Stromstärke führt in mittleren Bereichen zu den besten Schichteigenschaften. Bei geringen Stromstärken ist die Auftragsrate im Spritzprozess recht gering, wogegen bei hohen Stromstärken übermäßige thermische Belastungen der Beschichtung auftreten.

Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden die optimierten Spritzparameter, wie in Tabelle 5.4 dargestellt, festgelegt. Mit diesen Parametern lassen sich verschleißfeste Schichten herstellen, die in standardisierten Verschleißschuttests eine hohe Verschleißfestigkeit mit einer Verschleißrate von $35\mu\text{g}/k\text{N}$ aufweisen [TNL10].

Primärgasdruck [bar]	Sekundärgasdruck [bar]	Spannung [V]	Stromstärke [A]
6	4	30	220

Tabelle 5.4: Optimierte Prozessparameter für das Lichtbogenspritzen von WSC-Fe

5.3 Schlussfolgerung

In beiden Prozessparameterstudien konnten Parameter zur Herstellung von Schichten mit einer vielversprechenden Schichtmorphologie und -topographie, sowie einer hohen Verschleißfestigkeit gefunden werden. Allerdings lassen sich einige grundsätzliche Unterschiede zwischen den atmosphärisch plasmagespritzten und den lichtbogengespritzten Schichten feststellen, die bei der Beschichtung komplexer Oberflächen berücksichtigt werden müssen. Generell weist der Lichtbogenspritzprozess einen größeren Öffnungswinkel des Spritzstrahls, als der atmosphärische Plasmaspritzprozess, auf. Dadurch tritt auf Bauteilen mit starken Geometrieänderungen ein hoher Overspray auf und die Bahnplanung muss dementsprechend angepasst werden. Zudem weisen die lichtbogengespritzten Schichten eine wesentlich gröbere Schichtmorphologie und eine höhere Schichtrauheit auf. In Verbindung mit der geringeren Verschleißfestigkeit der WSC-Fe Schichten im Vergleich zu den plasmagespritzten WC-12Co Schichten müssen daher dickere Schichten aufgebracht werden. Ein großer Vorteil des Lichtbogenspritzprozesses ist seine Wirtschaftlichkeit, da sich mit diesem Verfahren sehr hohe Auftragsraten erzielen lassen, die bis zu 10mal höher als im Plasmaspritzprozess sind. Allerdings machen die hohen Auftragsraten die Bahnplanung unflexibler, da sich geringfügige Abweichungen in der Schichtdicke nur sehr begrenzt über die Anzahl der Spritzpistolenüberläufe korrigieren lassen.

Kapitel 6

Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Geometrien

Für eine endkonturnahe Beschichtung komplexer Bauteile mittels der Thermischen Spritztechnik wird eine genaue Kenntnis der relevanten Einflussgrößen im Spritzprozess benötigt. Eine gleichmäßige Schichtdicke und -qualität kann nur dann auf einer beliebigen Bauteiloberfläche erzielt werden, wenn nach einer Optimierung der Spritzprozessparameter an ebenen Substraten, kinematische Handhabungsparameter sowie Einflüsse der Bauteilgeometrie berücksichtigt werden. Andernfalls beschränken diese Parameter die Konturgenauigkeit der Beschichtung. In diesem Kapitel werden die **Haupteinflussgrößen bei der Beschichtung von komplexen Bauteilen** anhand des **Atmosphärischen Plasmaspritzens** und des **Lichtbogenspritzens** untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Identifikation allgemeiner und verfahrensspezifischer Einflüsse, sowie der Kontrollierbarkeit von Schichteigenschaften durch eine gezielte Variation der Einflussfaktoren. Zum Einsatz kommen hierbei die optimierten Spritzparameter aus Kapitel 5. In jedem Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse des atmosphärisch plasmagespritzten Schichtsystems WC-12Co und die Ergebnisse des lichtbogen-gespritzten Schichtsystems WSC-Fe rein deskriptiv vorgestellt. Im Anschluß werden die Ergebnisse in einer gemeinsamen Diskussion zusammengeführt. Dieser formale Aufbau ermöglicht eine genauere Herausarbeitung der verfahrensbedingten Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Spritzverfahren, sowie eine Meßergebnis übergreifende Diskussion der Versuchsergebnisse.

6.1 Spritzwinkel

Beim Thermischen Spritzen werden im Allgemeinen Bauteile mit einem Spritzwinkel von $\alpha = 90^\circ$ beschichtet. Hierbei tritt ein maximaler Energieübertrag der Spritzpartikel auf die Substratoberfläche auf und es bilden sich Schichten mit einer guten Schichtqualität. Bei einer hohen Komplexität des Bauteils kann allerdings nicht immer auf der gesamten Bauteiloberfläche der optimale, rechtwinkelige Spritzwinkel realisiert werden. Zur Erzielung einer gleichmäßigen Beschichtung ist es daher notwendig, den Einfluss des Spritzwinkels auf die Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten zu untersuchen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung des Spritzwinkels für das atmosphärisch plasmagespritzte Schichtsystem WC-12Co und das lichtbogen-gespritzte Schichtsystem WSC-Fe vorgestellt.

6.1.1 Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co

Die plasmagespritzten WC-12Co Schichten weisen ein gaußförmiges Profil auf (Abbildung 6.1). Bei allen Spritzwinkeln ließ sich in guter Näherung eine Anpassung mit einer gaußschen Verteilung gemäß Kapitel 4.5.2.1 vornehmen. Geringe Abweichungen an den Flanken des Profils zwischen Meßwert und Gaußanpassung sind auf die zeitliche Begrenzung des Spritzversuches zurückzuführen. Deutlich lässt sich in den Abbildungen erkennen, dass mit abnehmendem Spritzwinkels eine Änderung der Profilform von einem dünnen, spitzen Profil zu einem breiten, flachen Profil auftritt.

Auf Grundlage der maximalen Höhe der Gaußanpassung an das Spritzprofil z_{max} und der Anzahl der Überläufe wurde die Auftragsrate berechnet (Abbildung 6.2a). Zwischen 90° und 80° steigt die Auftragsrate zunächst geringfügig um $0,38 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ an. Unterhalb von 80° kann ein deutlicher, annähernd linearer Abfall von $8,20 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 80° auf $5,54 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 30° beobachtet werden.

Die Halbwertsbreite der WC-12Co Spritzschichten bleibt bei Spritzwinkeln zwischen 90° und 70° annähernd konstant (Abbildung 6.2b). Eine geringfügige Veränderung der Halbwertsbreite von $1,45 \text{ cm}$ bei 90° auf $1,54 \text{ cm}$ bei 80° und $1,50 \text{ cm}$ bei 70° kann auf statistische Schwankungen im Spritzprozess zurückgeführt werden. Unterhalb eines Spritzwinkels von 60° tritt eine deutliche Verbreiterung des Spritzstrahl auf. Die Halbwertsbreite steigt von $1,67 \text{ cm}$ bei 60° auf $2,30 \text{ cm}$ bei 30° an.

Die Spritzprofile weisen bei allen Spritzwinkeln eine negative Kurtosis auf (Abbildung 6.2c). Die Kurtosis gibt an, ob eine Verteilung im Vergleich zur Normalverteilung ein

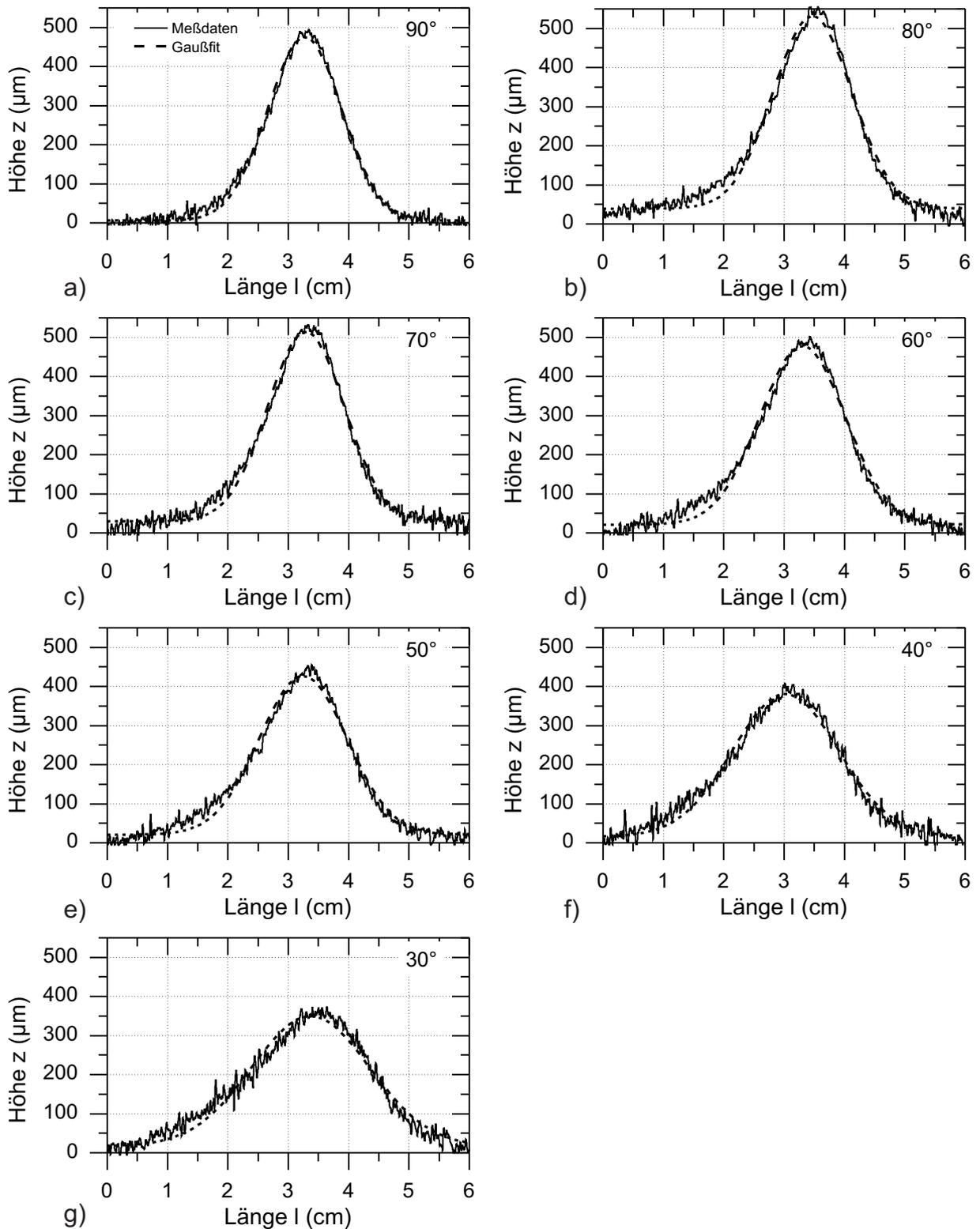


Abbildung 6.1: Gemessenes Spritzprofil der plasmagespritzten WC-12Co Schichten und Anpassung mit einer Gaußverteilung bei den Spritzwinkeln $\alpha =$ a) 90° , b) 80° , c) 70° , d) 60° , e) 50° , f) 40° , g) 30°

flach- oder steilgipfliges Profil hat (vgl. Kapitel 4.5.2.1). Die negative Kurtosis des WC-12Co Profils zeigt, dass in diesem Fall eine flachgipflige Verteilung vorliegt. Unterhalb von 90° kann eine deutliche Verringerung der Kurtosis beobachtet werden, bei 90° beträgt die Kurtosis $-0,17$. Bis zu einem Spritzwinkel von 30° fällt die Kurtosis auf $-1,20$ ab. Bei einem Spritzwinkel von 70° tritt ein Ausreißer aus dem allgemeinen Trend auf. Dem allgemeinen Verlauf nach, liegt der Wert hier mit $1,50$ zu hoch.

Bei allen Spritzwinkeln weisen die Spritzprofile eine positive Schiefe auf (Abbildung 6.2d). Die Schiefe ist ein Indikator für die Asymmetrie eines Profils (vgl. Kapitel 4.5.2.1). Eine positive Schiefe deutet darauf hin, dass die Massenkonzentration der Spritzprofile auf der linken Profilflanke vorliegt (in Abbildung 4.9 unten). Mit abnehmendem Spritzwinkel nimmt die Symmetrie der Spritzprofile zu. Die Schiefe sinkt von $1,13$ bei 90° auf $0,46$ bei 30° ab. Genau wie bei dem Diagramm der Kurtosis, zeigt sich bei der Schiefe ebenfalls ein von dem Trend abweichender Wert bei einem Spritzwinkel von 70° . Hier liegt mit $1,07$ ein zu großer Wert vor.

In Abbildung 6.3 sind der Auftragswirkungsgrad, die Porosität, die Rauheit, die Mikrohärtigkeit und die Haftzugfestigkeit der Spritzschichten als Funktion des Spritzwinkels dargestellt. Der Auftragswirkungsgrad steigt zunächst von $61,23 \pm 3,06\%$ bei 90° auf $64,27 \pm 3,21\%$ bei 80° an (Abbildung 6.3a). Unterhalb davon fällt der Auftragswirkungsgrad von $63,22 \pm 3,17\%$ bei 70° auf $55,50 \pm 2,77\%$ bei 30° ab. Anhand des gemessenen Verlaufes des Auftragswirkungsgrades wurde eine empirische Funktion ermittelt, die für die Bahnplanung bei der Beschichtung komplexer Bauteile genutzt wird. Um den Anstieg des Auftragswirkungsgrades zwischen 90° und 80° zu erfassen, ist diese Funktion stückweise definiert.

Für den Auftragswirkungsgrad des Schichtsystems WC-12Co gilt:

$$DE_{WC-12Co}(\alpha) = \begin{cases} 88,59 - 0,30\alpha & \alpha \in [90^\circ, 80^\circ] \\ 45,64 + 0,39\alpha - 1,94 \cdot 10^{-3}\alpha^2 & \alpha \in]80^\circ, 20^\circ] \end{cases} \quad (6.1)$$

Hier ist $DE_{WC-12Co}$ [%] der Auftragswirkungsgrad und α [°] der Spritzwinkel. Die Änderung des Auftragswirkungsgrades bei Spritzwinkeln zwischen 80° und 20° wurde mit einer quadratischen Ausgleichsfunktion angepasst, da bei einer linearen Anpassung der degressive Verlauf zwischen 70° und 80° nicht erfasst worden wäre. Die Anpassung korreliert gut mit den Meßwerten und es wurde ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,95$ ermittelt.

Zur Vereinfachung der Bahnplanung wurde eine Normierung der empirisch ermit-

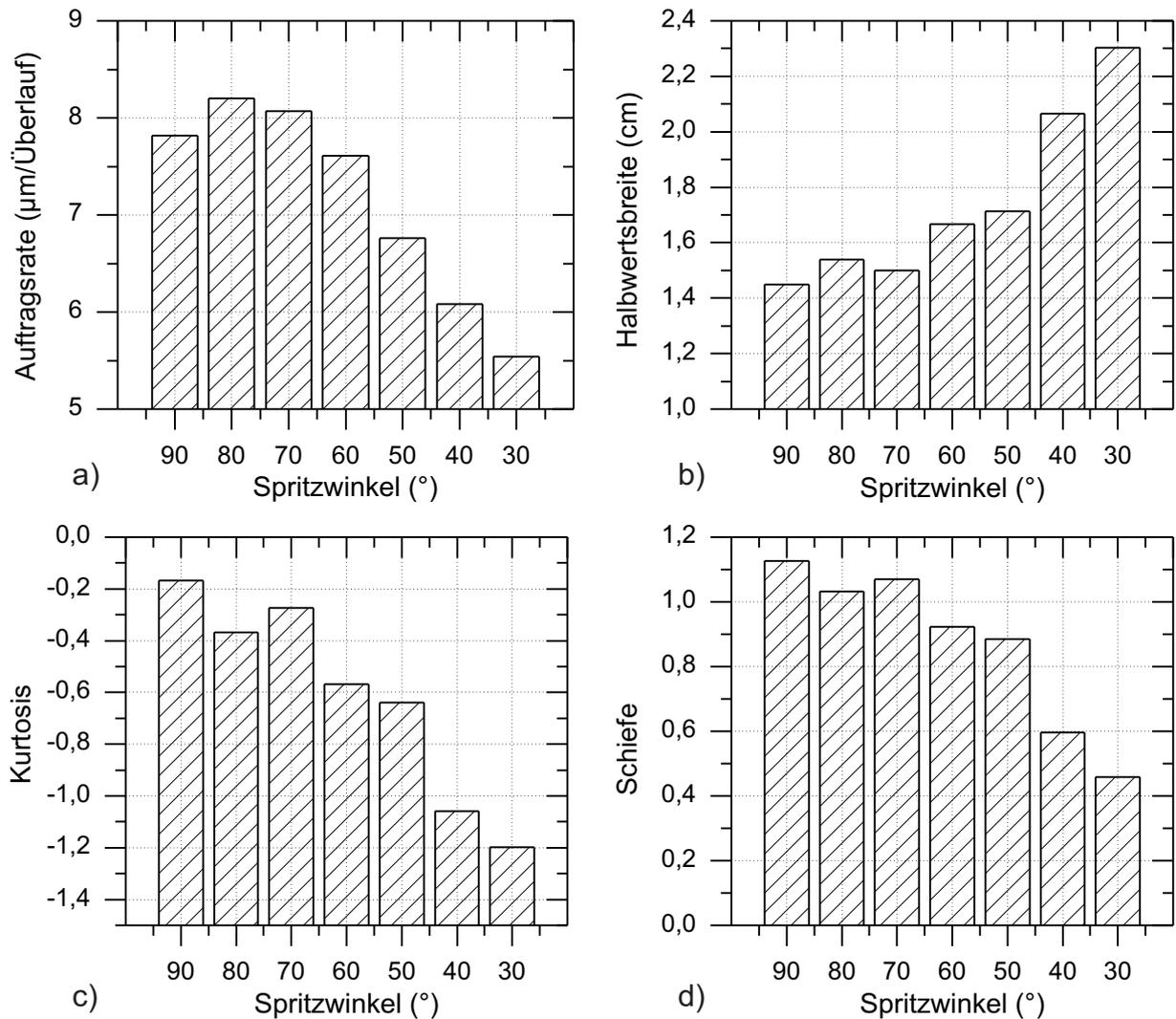


Abbildung 6.2: a) Auftragsrate, b) Halbwertsbreite, c) Kurtosis, d) Schiefe von plasma-spritzten WC-12Co Schichten. Alle Parameter wurden über Gaußanpassungen ermittelt

telten Funktion des Auftragswirkungsgrades durchgeführt. Durch diese Normierung entspricht der Auftragswirkungsgrad bei einem Spritzwinkel von 90° einem Wert von 100% und die Auswirkung einer Änderung des Spritzwinkels auf eine gegebene Schichtdicke kann direkt berechnet werden:

$$DE_{N,WC-12Co}(\alpha) = \begin{cases} 144,68 - 0,50\alpha & \alpha \in [90^\circ, 80^\circ] \\ 74,33 + 0,65\alpha - 3,26 \cdot 10^{-3}\alpha^2 & \alpha \in]80^\circ, 20^\circ] \end{cases} \quad (6.2)$$

Hierbei ist $DE_{N,WC-12Co}$ [%] der normierte Auftragswirkungsgrad und α [°] der Spritzwinkel. Das Bestimmtheitsmaß des prozentualen Auftragswirkungsgrads liegt ebenfalls bei $R^2 = 0,95$.

Bei Spritzwinkeln zwischen 90° und 50° bilden sich dichte Schichten (Abbildung 6.3b). Zwischen 90° und 70° kann ein leichtes Abfallen der Porosität beobachtet werden. Bei 90° beträgt die Porosität $5,60 \pm 0,51\%$, bei 80° $4,51 \pm 0,92\%$ und bei 70° $4,10 \pm 0,34\%$. Dieser Abfall verläuft annähernd parallel zu dem Ansteigen der Auftragsrate und des Auftragswirkungsgrades bis zu einem Spritzwinkel von 80° . Unterhalb von 70° wird eine zunehmende Porosität beobachtet. Sie steigt auf den Wert $12,88 \pm 2,32\%$ bei einem Spritzwinkel von 30° an. Bei der Verwendung eines Spritzwinkels von 60° zeigt sich ein Ausreißer aus dem allgemeinen Trend. Die hier gemessene Porosität ist mit $6,66 \pm 0,57\%$ höher als erwartet. Dies lässt sich auf statistische Schwankungen des Spritzprozesses und Messungenauigkeiten bei der optischen Messung der Schichtporosität zurückführen.

Die Spritzschichten weisen bei Spritzwinkeln von 90° bis 70° eine geringe Rauheit auf (Abbildung 6.3c). Genau wie bei dem Verlauf der Porosität kann zwischen 90° mit $32,20 \pm 1,66 \mu\text{m}$ und 80° mit $30,87 \pm 3,79 \mu\text{m}$ ein Abfall der Rauheit beobachtet werden. Unterhalb von 70° steigt die Rauheit der Spritzschichten zunächst langsam bis auf $35,85 \pm 2,94 \mu\text{m}$ bei 50° und schließlich steil auf $53,15 \pm 3,2 \mu\text{m}$ bei 30° an.

Die WC-12Co Spritzschichten weisen bei allen Spritzwinkeln eine hohe Mikrohärtigkeit auf (Abbildung 6.3d). Der geringste Wert wurde bei 90° mit $1085 \pm 98 HV_{0,1}$, der höchste Wert bei 70° mit $1240 \pm 143 HV_{0,1}$ gemessen. Die geringfügigen Schwankungen der Härtewerte zwischen 90° und 30° werden durch das mehrphasige Schichtgefüge und die geringe Breite der Indentation verursacht. Ein Einfluss des Spritzwinkels auf die Mikrohärtigkeit der Spritzschichten kann nicht beobachtet werden.

Die Haftzugfestigkeit der Spritzschichten sinkt mit abnehmendem Spritzwinkel ab (Abbildung 6.3e). Bei einem Spritzwinkel von 90° beträgt die Haftzugfestigkeit $66,70 \pm 7,92 N/mm^2$, bei 60° $52,80 \pm 7,02 N/mm^2$ und bei 30° $28,90 \pm 2,10 N/mm^2$. Es zeigt sich damit ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Haftung der Spritzschichten und dem Spritzwinkel.

In Abbildung 6.4 sind lichtmikroskopische Aufnahmen der Querschliffe von WC-12Co Schichten bei unterschiedlichen Spritzwinkeln dargestellt. Von der Aufnahme a) bis c) nimmt der Spritzwinkel von 90° bis 30° ab. Die gemessenen Schichtparameter spiegeln sich in den Querschliffen wieder. Zwischen 90° und 70° zeigen sich dichte und glatte Schichten. Ab 60° steigt die Porosität der Schichten signifikant an und besonders bei 30° weisen die Schichten eine sehr hohe Rauigkeit auf. Unterhalb eines Spritzwinkels von 60° steigt sowohl die Anzahl, als auch die durchschnittliche Größe, der Poren an. Zusätzlich zeigen sich unterhalb von 60° kleine, horizontale Risse im Schichtgefüge

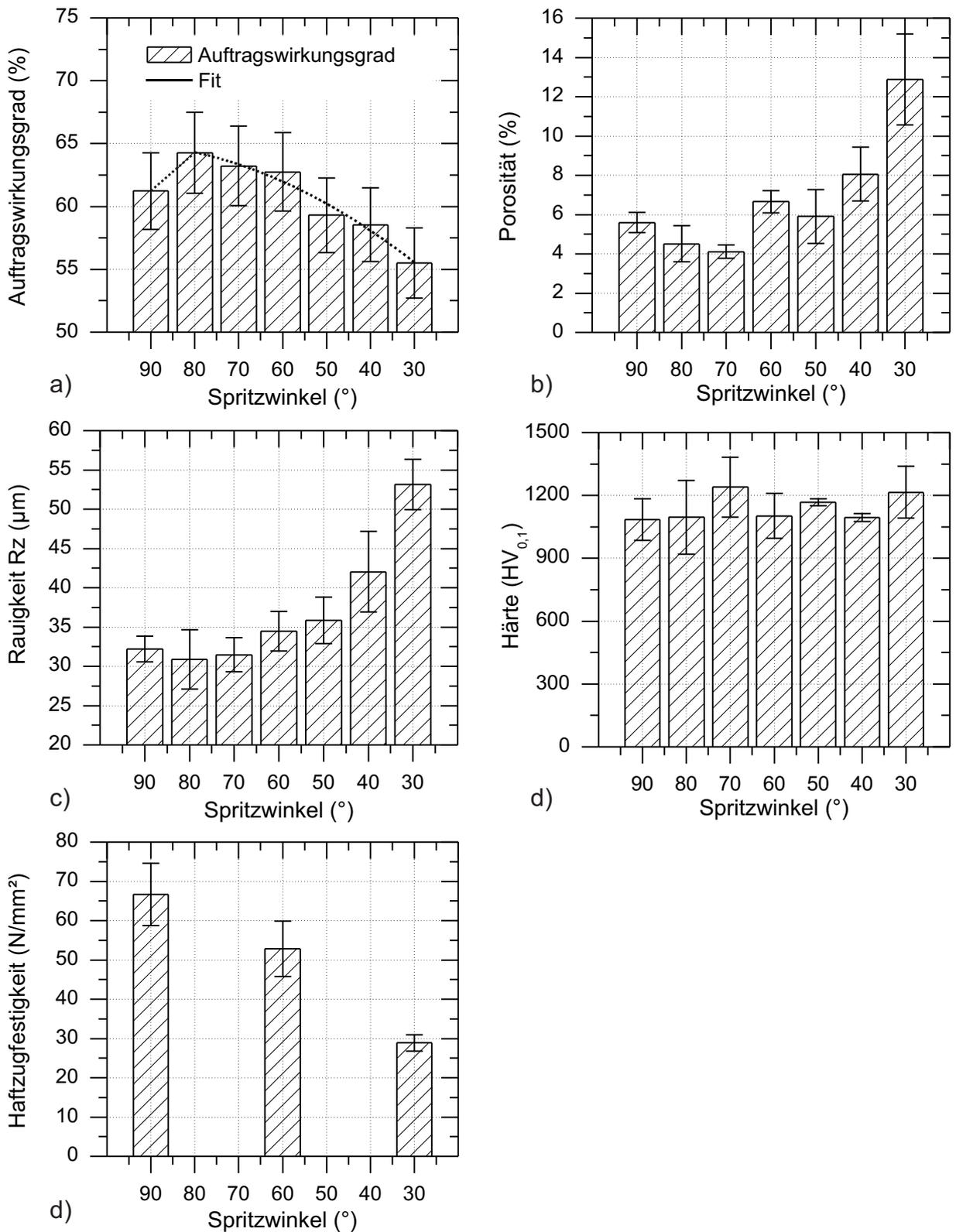


Abbildung 6.3: a) Auftragswirkungsgrad, b) Porosität, c) Rauigkeit, d) Mikrohärte, d) Haftzugfestigkeit als Funktion des Spritzwinkels für plasmagespritzte WC-12Co Schichten

und es kann eine deutlich lockerere Packung der einzelnen teilgeschmolzenen Pulverpartikel beobachtet werden.

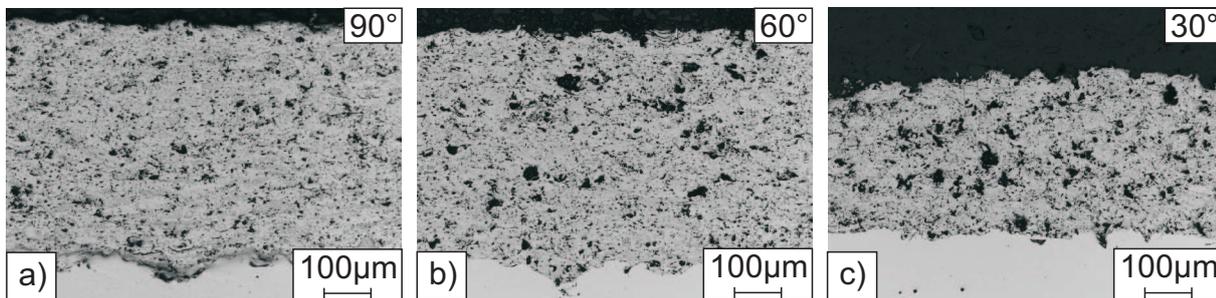


Abbildung 6.4: Lichtmikroskopische Querschliffe von WC-12Co Schichten, die mit einem Spritzwinkel von a) 90°, b) 60°, c) 30° hergestellt wurden

6.1.2 Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe

Die lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten weisen ebenfalls bei allen Spritzwinkeln ein gaußförmiges Profil auf (Abbildung 6.5). Analog zu Kapitel 6.1.1 wurde zur Untersuchung der Geometrieänderung des Profils, bei einer Änderung des Spritzwinkels, eine Anpassung mit Gaußverteilungen vorgenommen. Geringe Abweichungen zwischen experimentell ermittelten Werten und der theoretischen Anpassung können nur an den Flanken der Spritzprofile beobachtet werden und sind auf die zeitliche Begrenzung des Versuchs zurückzuführen. Mit abnehmendem Spritzwinkel ändert sich die Form des Profils, das breiter und flacher wird. Unterhalb von 40° kann ein Übergang der Profilform in eine bimodale Verteilung beobachtet werden. Aufgrund der geringen Ausprägung der Bimodalität und für eine bessere Vergleichbarkeit mit den Spritzprofilen bei höheren Spritzwinkeln wurde hier ebenfalls eine Anpassung mit einer einzigen Gaußverteilung vorgenommen.

In Abbildung 6.6 sind die Ergebnisse der geometrischen Auswertung der WSC-Fe Spritzprofile bei unterschiedlichen Spritzwinkeln dargestellt. Die Auftragsrate, daher die maximale Höhe des Spritzprofils z_{max} dividiert durch die Anzahl der Spritzpistolenüberläufe, sinkt annähernd linear um knapp 60% von 49,92 µm/Überlauf bei 90° auf 21,32 µm/Überlauf bei 30° ab (Abbildung 6.6a).

Die Halbwertsbreite der Spritzprofile bleibt bei Spritzwinkeln oberhalb von 60° annähernd konstant (Abbildung 6.6b). Zwischen 90° und 60° kann nur ein geringfügiger Anstieg der Halbwertsbreite um ca. 10 % von 1,81 cm bei 90° auf 1,99 cm bei 60° beobachtet werden. Unterhalb von 60° tritt jedoch eine starke Verbreiterung des Spritzprofils auf, bis schließlich bei 30° eine Halbwertsbreite von 3,62 cm vorliegt. Somit fand

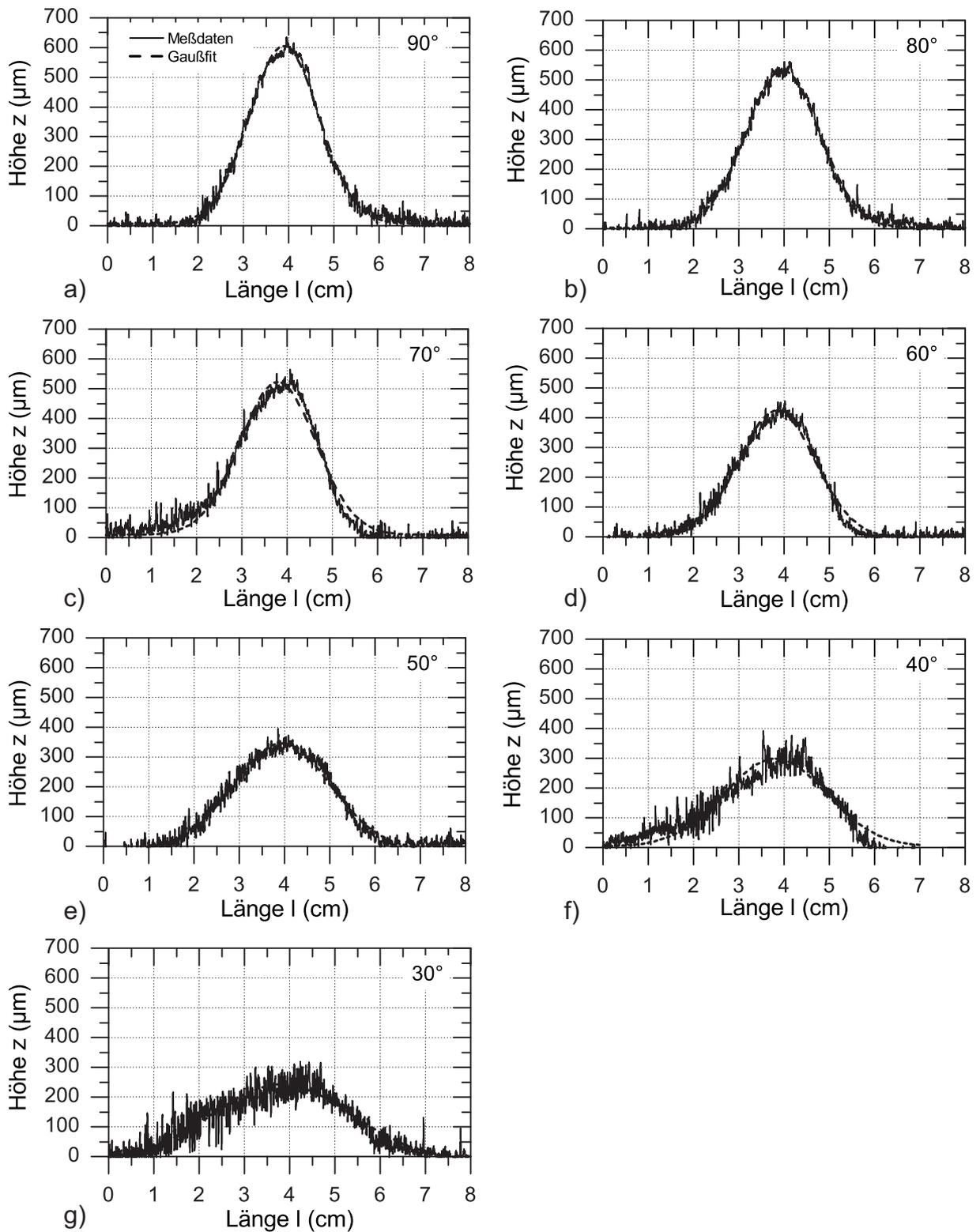


Abbildung 6.5: Gemessenes Spritzprofil der lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten und Anpassung mit einer Gaußverteilung bei den Spritzwinkeln $\alpha =$ a) 90° , b) 80° , c) 70° , d) 60° , e) 50° , f) 40° , g) 30°

eine Verdoppelung der Halbwertsbreite im Vergleich zu 90° statt.

Die Spritzprofile weisen bei allen Spritzwinkeln eine negative Kurtosis auf (Abbildung 6.6c). Die Schichten haben daher im Vergleich zu einer Normalverteilung eine flachgipfligere Form (vgl. Kapitel 4.5.2.1). Zwischen 90° und 60° sinkt die Kurtosis geringfügig von $-0,20$ bei 90° auf $-0,57$ bei 60° ab. Unterhalb von 60° tritt ein Sprung auf. Die Kurtosis verringert sich auf $-1,15$ bei 50° und bleibt dann annähernd konstant bis 30° .

Die Schiefe der lichtbogengespritzten Schichten ist bei allen Spritzwinkeln positiv (Abbildung 6.6d). Die Massenkonzentration liegt somit auf der linken Seite der Spritzprofile, d.h. in Richtung der Spritzpistole (vgl. Kapitel 4.5.2.1). Der Trend der Schiefe verläuft bis 60° parallel zu der Kurtosis. Es tritt eine geringfügige Verringerung der Schiefe von $1,15$ bei 90° bis $0,99$ bei 60° auf. Unterhalb von 60° lässt sich ein steiler Abfall der Schiefe auf $0,29$ bei 30° beobachten.

In Abbildung 6.7 ist der gemessene Verlauf des Auftragswirkungsgrades, der Porosität, der Rauigkeit, der Mikrohärtigkeit und der Haftzugfestigkeit als Funktion des Spritzwinkels dargestellt. Der Auftragswirkungsgrad (Abbildung 6.7a) verläuft parallel zu der Auftragsrate. Bei einer Verringerung des Spritzwinkels kann ein Abfall des Auftragswirkungsgrades von $92,87 \pm 0,60\%$ bei 90° auf $80,34 \pm 0,66\%$ bei 30° beobachtet werden. Genau wie bei den atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten wurde eine empirische Funktion für den Auftragswirkungsgrad ermittelt. Sie lautet:

$$DE_{WSC-Fe}(\alpha) = 69,18 + 0,42\alpha - 1,66 \cdot 10^{-3}\alpha^2 \quad (6.3)$$

Hier ist DE_{WSC-Fe} [%] der Auftragswirkungsgrad und α [°] der Spritzwinkel. Der Verlauf des Auftragswirkungsgrades bei einer Änderung des Spritzwinkels konnte gut durch eine quadratische Funktion beschrieben werden. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung beträgt $R^2 = 0,98$.

Für eine einfachere Bahnplanung wurde zusätzlich ein normierter Verlauf des Auftragswirkungsgrades berechnet.

$$DE_{N,WSC-Fe}(\alpha) = 74,13 + 0,47\alpha - 1,92 \cdot 10^{-3}\alpha^2 \quad (6.4)$$

Hierbei ist $DE_{N,WSC-Fe}$ [%] der normierte Auftragswirkungsgrad und α [°] der Spritzwinkel. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung beträgt $R^2 = 0,99$. Genau wie bei dem Schichtsystem WC-12Co bietet eine prozentuale Angabe des Auftragswirkungsgrades

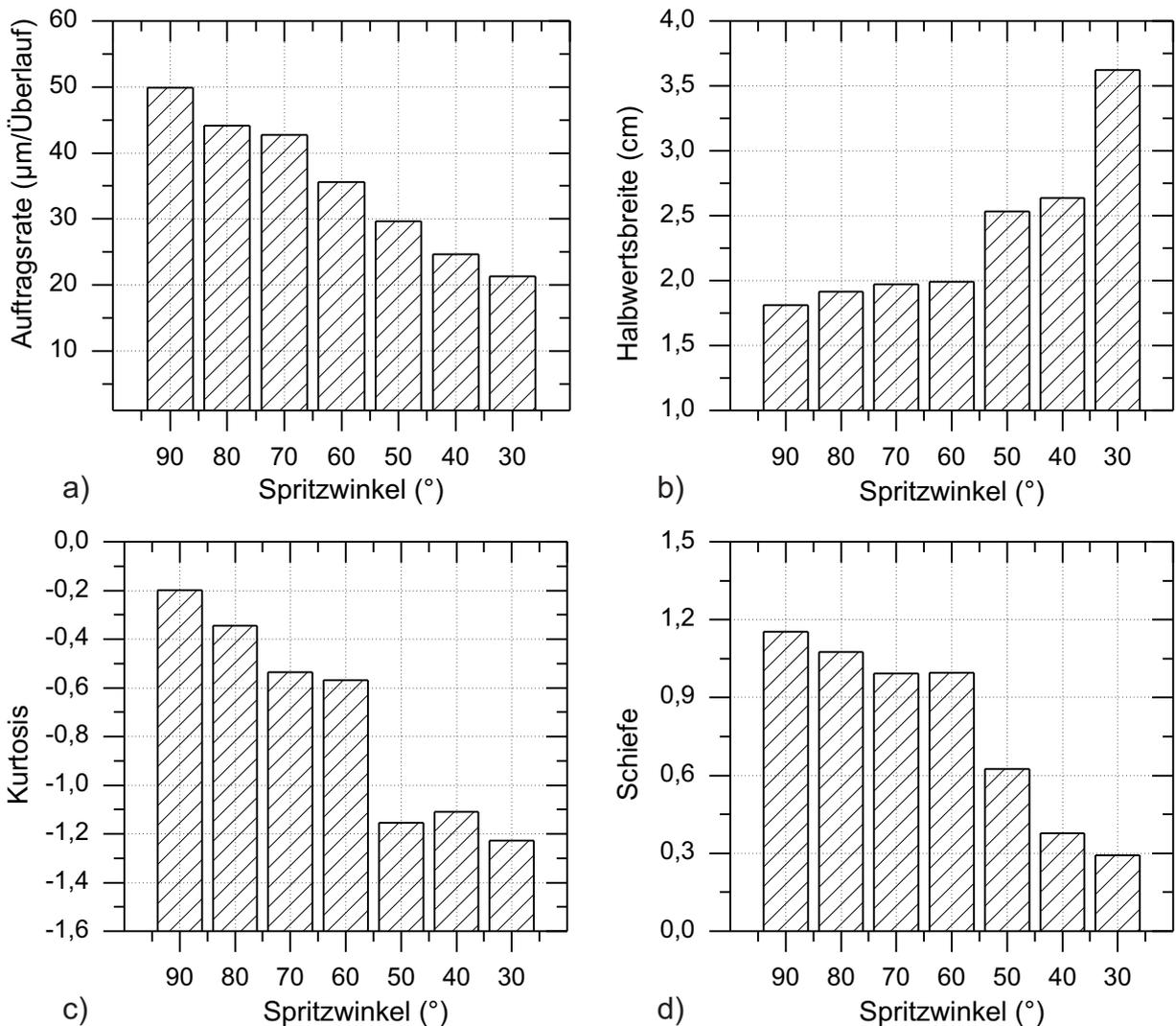


Abbildung 6.6: a) Auftragsrate, b) Halbwertsbreite, c) Kurtosis, d) Schiefe von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten. Alle Parameter wurden über Gaußanpassungen ermittelt

als Funktion des Spritzwinkels bei der Bahnplanung große Vorteile, da hierdurch für eine beliebige Sollschichtdicke der Spritzwinkel direkt berechnet werden kann.

Die Porosität der Spritzschichten (Abbildung 6.7b) steigt tendenziell von $3,33 \pm 1,03\%$ bei 90° auf $5,83 \pm 1,11\%$ bei 50° an. Unterhalb von 50° wird ein erneuter Abfall der Porosität auf $3,69 \pm 1,19\%$ bei 40° und $4,57 \pm 1,55\%$ bei 30° beobachtet. Der deutlich nichtlineare Verlauf der Messwerte bei einer Änderung des Spritzwinkels zeigt, dass bei dem lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichtsystem kein trivialer Zusammenhang zwischen dem Spritzwinkel und der Porosität vorliegt. Zum Teil können die schwankenden Messwerte auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden. Abweichungen der Porosität um mehrere Prozent sind aber ein deutliches Indiz für eine Änderung der Mikrostruktur der Spritzschichten.

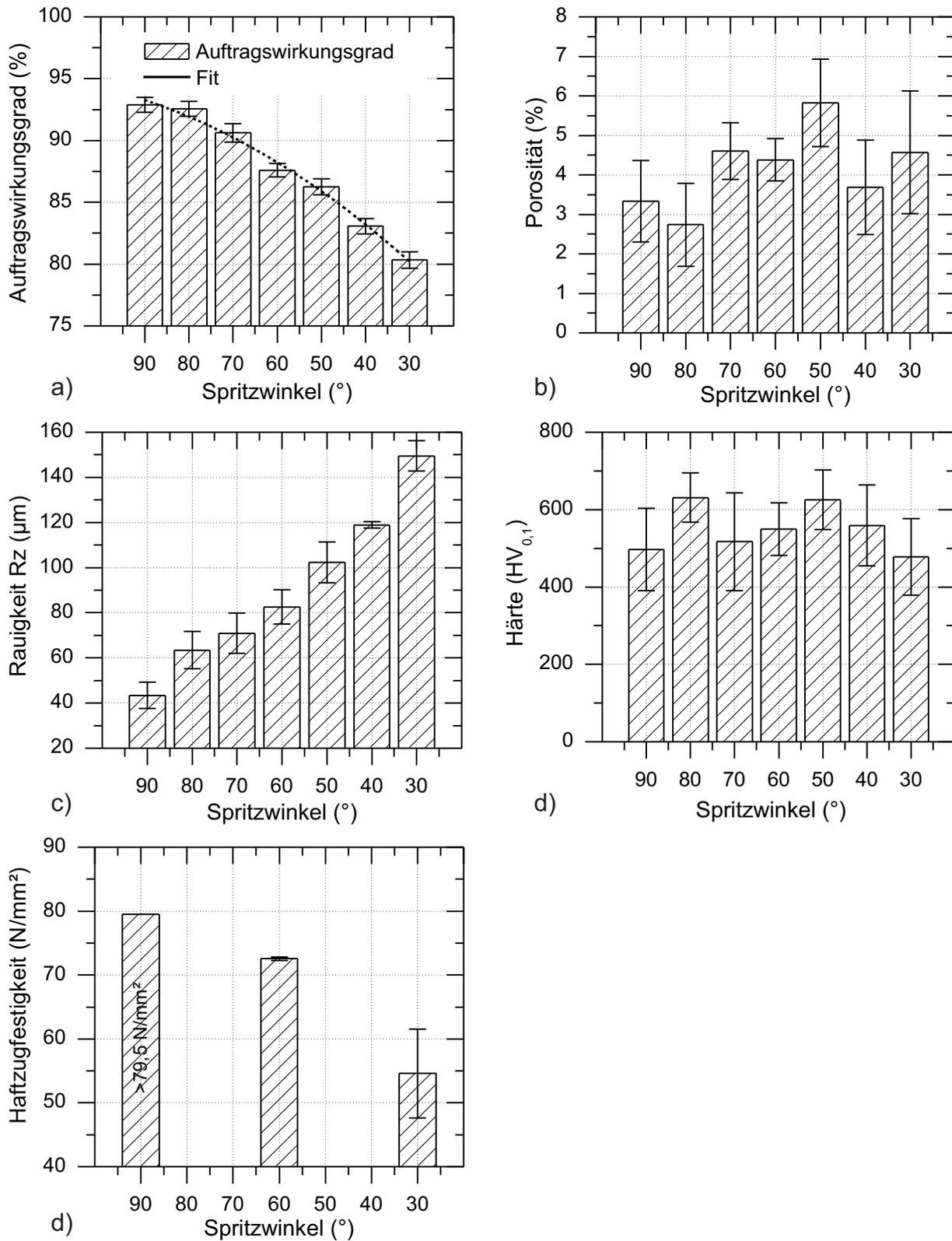


Abbildung 6.7: a) Auftragswirkungsgrad, b) Porosität, c) Rauigkeit, d) Mikrohärtigkeit, e) Haftzugfestigkeit als Funktion des Spritzwinkels für lichtbogengespritzte WSC-Fe-Schichten

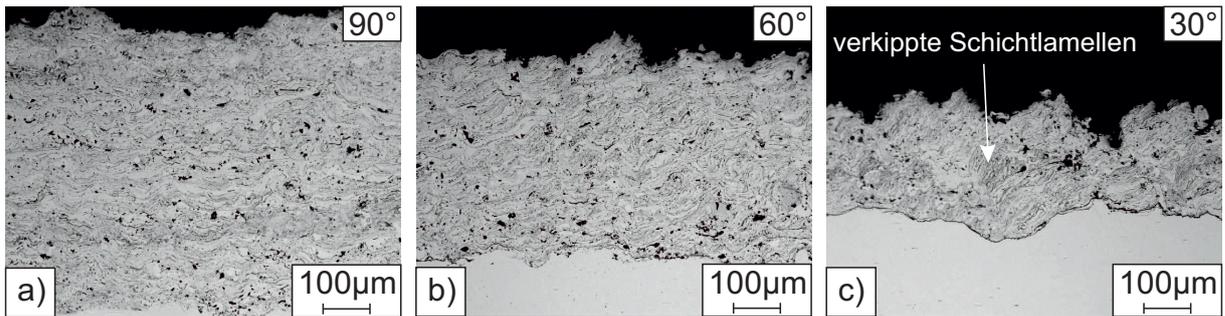


Abbildung 6.8: Lichtmikroskopische Querschliffe von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten, die mit einem Spritzwinkel von a) 90°, b) 60°, c) 30° hergestellt wurden

Die Rauigkeit der Spritzschichten (Abbildung 6.7c) steigt nahezu linear von $43,41 \pm 5,78 \mu\text{m}$ bei 90° auf $149,53 \pm 6,74 \mu\text{m}$ bei 30° an. Dies ist ein Indikator für eine Veränderung der Mikrostruktur der Spritzschichten bei einer Änderung des Spritzwinkels.

Zwischen 90° und 50° kann keine eindeutige Abhängigkeit der Mikrohärtigkeit von dem Spritzwinkel festgestellt werden (Abbildung 6.7d). Die schwankenden Messwerte oberhalb von 50° sind auf ein mehrphasiges Schichtgefüge zurückzuführen. Ein Indiz dafür ist die verhältnismäßig hohe Standardabweichung der Messwerte um bis zu $126 \text{HV}_{0,1}$ bei 70°. Im Mittel beträgt die Härte $564 \pm 62 \text{HV}_{0,1}$. Unterhalb von 50° lässt sich ein leichter Abfall der Schichthärtigkeit erkennen. Sie verringert sich von $625 \pm 77 \text{HV}_{0,1}$ bei 50° auf $478 \pm 99 \text{HV}_{0,1}$ bei 30°.

Die Haftzugfestigkeit der Spritzschichten (Abbildung 6.7e) ändert sich signifikant bei einer Verringerung des Spritzwinkels. Bei 90° weisen die Schichten eine Haftzugfestigkeit größer als $79,5 \text{N/mm}^2$ auf. Hier konnte im Zugversuch kein Versagen der Beschichtung herbeigeführt werden. Dagegen ist die Haftzugfestigkeit bei 60° auf $72,57 \pm 0,27 \text{N/mm}^2$ und bei 30° auf $54,59 \pm 6,95 \text{N/mm}^2$ abgefallen.

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen an Querschliffen der WSC-Fe Proben (Abbildung 6.8) zeigen eine charakteristische Ausrichtung des lamellaren Schichtgefüges. Bei einem Spritzwinkel von 90° verlaufen die Schichtlamellen parallel zu der Substratoberfläche. Zwischen 90° und 60° tritt nur eine geringfügige Verkipfung der Schichtlamellen schräg zu der Substratoberfläche auf. Unterhalb von 60° ordnen sich dagegen die Schichtlamellen senkrecht zum Strahl des Spritzbrenners an. Als Folge wachsen die Schichtlamellen schräg aus der Substratoberfläche heraus, die Schichtrauigkeit steigt an und eine Schichtwelligkeit entsteht. Zwischen zwei Wellenbergen wachsen zudem Bänder aus Mikro- und Makroporen.

6.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Sowohl die plasmagespritzten WC-12Co Schichten als auch die lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten zeigen eine deutliche Abhängigkeit vom Spritzwinkel. Bei beiden Schichtsystemen wirkt sich eine Änderung des Spritzwinkels auf die Geometrie des Spritzprofils, die mikrostrukturellen Schichteigenschaften und die Funktionseigenschaften der Beschichtungen aus. Bei beiden Schichtsystemen wurden vergleichbare Effekte beobachtet, deren Ausprägung jedoch von der Art des Spritzverfahrens und dem eingesetzten Spritzzusatz abhängt.

Die geometrische Formänderung des gaußförmigen Spritzprofils bei einer Änderung des Spritzwinkel kann auf die geometrischen Randbedingungen im Spritzprozess zurückgeführt werden. Bei einer Verringerung des Spritzwinkels vergrößert sich der beschichtete Bereich w auf der Substratoberfläche (vgl. Abbildung 6.9). Dieser Bereich entspricht einer Projektion des Spritzstrahls auf die Substratoberfläche. Bei einer Vergrößerung dieses Bereiches verteilen sich folglich die auftreffenden Partikel auf eine größere Fläche und unter der Annahme eines konstanten Massenflusses im Spritzprozess, verringert sich die Höhe des Spritzprofils. Dieser Effekt wurde sowohl bei den atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co, als auch bei den lichtbogengespritzten WSC-Fe Spritzprofilen beobachtet. Bei beiden Schichtsystemen sinkt die Auftragsrate bei einer Verringerung des Spritzwinkels ab. Aufgrund der geometrischen Randbedingungen wäre ein Abfall der Auftragsrate mit dem Faktor $\cos(\alpha)$ zu erwarten [MW10]. Dies kann allerdings durch den gemessenen Verlauf der Auftragsrate nicht bestätigt werden.

Die Halbwertsbreite des Spritzprofils korreliert mit der Breite des beschichteten Bereiches w . In Bezug auf die Geometrie des Beschichtungsprozesses sollte auch hier ein Anstieg der Halbwertsbreite nach einer Winkelfunktion auftreten. Die Messwerte zeigen dagegen eine konstante Halbwertsbreite bei Spritzwinkeln um 90° und ein steilen Anstieg der Halbwertsbreite unterhalb eines Grenzwinkels. Dieser Grenzwinkel liegt bei den atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten bei 50° und bei den lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei 60° . Unterhalb dieses Grenzwinkels tritt ebenfalls ein Sprung der Kurtosis und der Schiefe der Spritzprofile auf. Die Kurtosis der Spritzprofile ist bei allen Spritzwinkeln negativ. Das bedeutet, dass die Spritzprofile im Vergleich zu einer Normalverteilung eine eher flache und breite („flachgipflige“) Kontur aufweisen. Bis zu dem Grenzwinkel ändert sich die Kurtosis nur geringfügig, während unterhalb des Grenzwinkels ein deutlicher Abfall der Kurtosis gemessen wird. Diese sprunghafte Änderung der Profilform ist hauptsächlich in dem plötzlichen An-

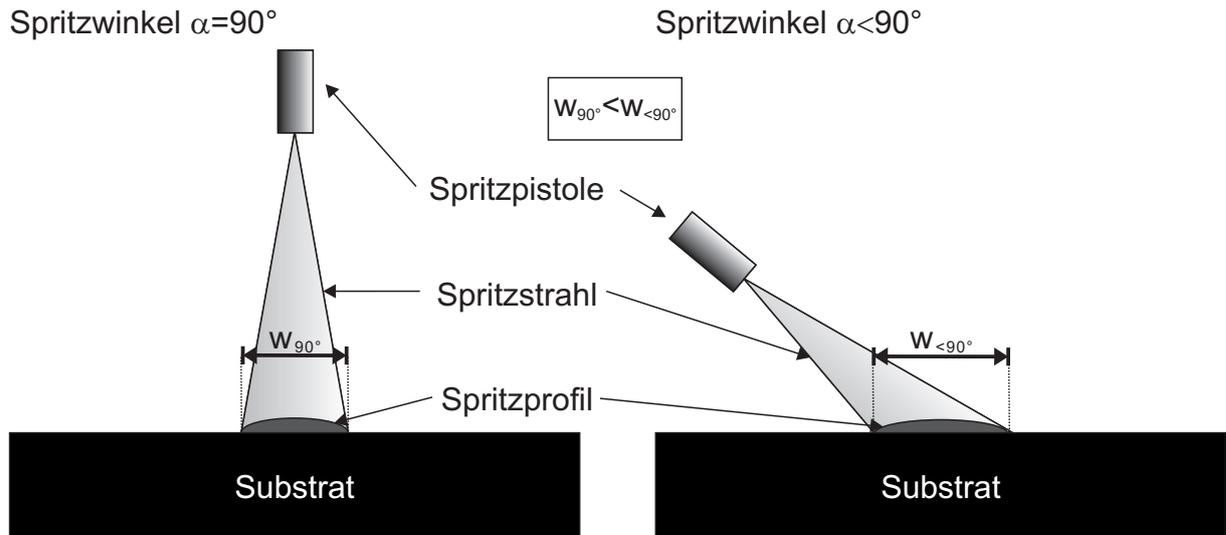


Abbildung 6.9: Schematische Darstellung des Einflusses des Spritzwinkels auf die Änderung des Spritzprofils

wachsen der Halbwertsbreite begründet.

Beide Spritzprofile weisen eine positive Schiefe bei einem Spritzwinkel von 90° auf. Beim Lichtbogenspritzen wird die Schiefe durch die asymmetrische Gasströmung, sowie das ungleichmäßige Abschmelzen der Drähte im Lichtbogen verursacht. Dies sind in der Fachliteratur vielfach beschriebene Effekte [WWPH98, WSN02, KH02]. Beim atmosphärischen Plasmaspritzen bewirkt eine radiale Pulvereindüsung durch einen externen Pulverinjektor, dass das expandierende Plasmagas eine Geschwindigkeitskomponente senkrecht zu der Ausbreitungsrichtung der Spritzflamme erhält, wodurch der Spritzpartikelstrahl verkippt. Bei den für diese Arbeit gewählten Spritzparametern führt dieser Effekt zu einer Verkipfung des Spritzstrahls nach unten (Abbildung 6.10). Als Konsequenz treffen die Spritzpartikel bei einem Spritzwinkel von 90° effektiv mit einem geringeren Spritzwinkel auf die Substratoberfläche auf. Dies hat hauptsächlich einen Einfluss auf die Auftragsrate im Plasmaspritzprozess. Eine Verringerung des Spritzwinkels von 90° auf 80° kompensiert die Schiefe des Spritzstrahls und folglich steigt die Auftragsrate an. Erst unterhalb von 80° tritt der im Vorhinein beschriebene Abfall der Auftragsrate auf. Für die Bahnplanung bedeutet diese Erkenntnis, dass eine Veränderung des Spritzwinkels gezielt dazu genutzt werden kann, prozessbedingte Asymmetrien des Spritzstrahls zu kompensieren. Ein derartiges Vorgehen wird auch in den Veröffentlichungen von Fasching et al. empfohlen [FWP92, FPW93].

Den geometrischen Randbedingungen nach müsste sich die Schiefe der Spritzprofile stetig bei einer Verringerung des Spritzwinkels ändern, da sich bei einer Verdrehung des Substrates der Massenschwerpunkt des Spritzprofils kontinuierlich in Richtung

der Spritzpistole verschiebt. Folglich sollte es zu einer stetigen Änderung der Spritzprofilform kommen. In den Experimenten wurde jedoch nur ein marginaler Abfall der Schiefe oberhalb des Grenzwinkels beobachtet, während unterhalb dessen ein Sprung zu kleinen Werten auftritt. Der Verlauf der Schiefe kann somit nicht ausschließlich auf die geometrischen Gegebenheiten des Spritzprozesses zurückgeführt werden.

Die Tatsache, dass die Schiefe bei einer Verringerung des Spritzwinkels absinkt und nicht ansteigt ist ein Resultat der gewählten Geometrie in der Versuchsreihe. Hier wurde das Substrat bei einer Verringerung des Spritzwinkels entgegen der Schiefe des Spritzprofils verdreht und folglich nimmt die Symmetrie des Spritzprofils zu. Eine Verdrehung des Substrates in die entgegengesetzte Richtung würde hingegen einen Anstieg der Schiefe bewirken. Vergleichbare Ergebnisse wurden ebenfalls in den Arbeiten von Leigh et al. ermittelt [LB97].

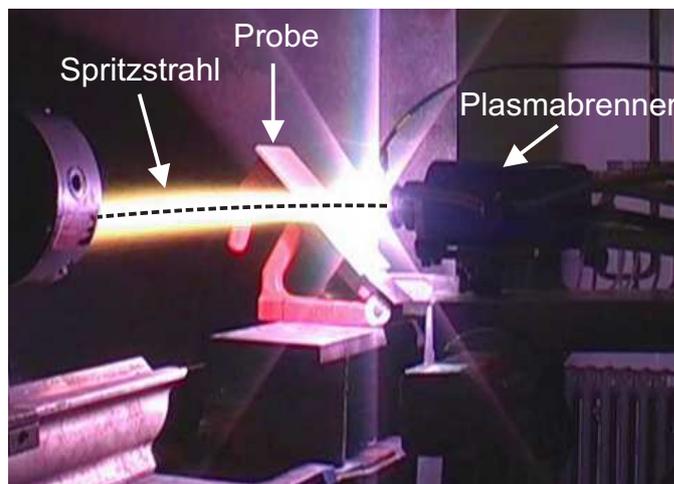


Abbildung 6.10: Experimenteller Aufbau bei der Untersuchung des Spritzwinkels. Eine rechtwinkelige Pulvereindüsung in die Plasmaflamme bewirkt einen schrägen Spritzstrahl

Die Änderung der Geometrie des Spritzprofils bei einer Verringerung des Spritzwinkels kann nicht alleine durch die geometrischen Randbedingungen im Spritzprozess erklärt werden. Würde alleine die Geometrie im Spritzprozess die Formänderung des Spritzprofils bewirken, so müssten sich die geometrischen Parameter des Spritzprofils stetig entsprechend der Winkelfunktionen verändern. Dieser Zusammenhang wurde in den vorhergehenden Diskussionen widerlegt. Außerdem würden bei einer rein geometrischen Veränderung des Spritzprofils keine Effekte, wie ein Verlust von Spritzgut durch ein unterschiedliches Abprallen der Spritzpartikel von der Substratoberfläche bei verschiedenen Spritzwinkeln, auftreten. In der Realität haben jedoch neben den geometrischen Randbedingungen weitere Effekte einen Einfluss auf das resultierende Schichtprofil.

Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, teilt sich die Partikelgeschwindigkeit beim Aufprall auf das Substrat in eine Normalkomponente V_N und eine Tangentialkomponente V_T auf. Die Normalkomponente bewirkt die Bildung einer Schicht, während die Tangentialkomponente zu einem Zurückprallen oder Abgleiten der Spritzpartikel beim Aufprall auf die Substratoberfläche führt. Bei einem Spritzwinkel von 90° ist V_N maximal und V_T gleich Null. Mit abnehmendem Spritzwinkel sinkt der Anteil von V_N und parallel dazu steigt der Anteil von V_T , so dass bei einem Spritzwinkel von 0° theoretisch V_N gleich Null und V_T maximal ist.

Bei einer Verringerung des Spritzwinkels führt der Anstieg der Tangentialkomponente V_T in Verbindung mit dem Abfall der Normalkomponente V_N der Partikelgeschwindigkeit dazu, dass die Spritzpartikel beim Aufprall auf die Substratoberfläche mit höherer Wahrscheinlichkeit abprallen. Dieser Effekt spiegelt sich in dem gemessenen Auftragswirkungsgrad wieder. Mit abnehmendem Spritzwinkel sinkt der Auftragswirkungsgrad bei beiden Spritzverfahren ab und folglich sinkt der Anteil an schichtbildenden Spritzpartikeln im Spritzprozess.

Der Abfall der Normalkomponente V_N hat zusätzlich zur Folge, dass die Spritzpartikel mit einer geringeren kinetischen Energie auf das Substrat auftreffen und sich dadurch lockerer gepackte Schichten mit einer höheren Porosität bilden. Dieser Effekt kann besonders bei den WC-12Co Schichten unterhalb des Grenzwinkels beobachtet werden. Das locker gepackte Gefüge bei kleinen Spritzwinkeln hat zur Folge, dass sich die Spritzteilchen beim Aufprall auf das Substrat nicht mehr adäquat verklammern. Dadurch verringert sich die Haftung im Schichtverbund und die Haftzugfestigkeit der Spritzschichten sinkt ab.

Der Anstieg der Schichtrauheit der Spritzschichten sowie der Verlauf der Porosität der lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten wird durch einen weiteren Effekt verursacht. Unterhalb von 90° treffen die Spritzpartikel nicht senkrecht auf das Substrat auf. Dies führt dazu, dass nicht die gesamte Substratoberfläche gleichmäßig beschichtet wird, sondern die auf das Substrat auftreffenden Partikel über die Oberfläche abgleiten und hauptsächlich an Unebenheiten der Oberfläche anhaften. An diesen Unebenheiten akkumulieren die auftreffenden Partikel und es bildet sich eine Schicht mit einer sägezahnförmigen Oberfläche. Eine Verringerung des Spritzwinkels führt dazu, dass dieser Effekt verstärkt auftritt und als Konsequenz die Rauigkeit der Spritzschichten ansteigt. Bei den plasmagespritzten Schichten kann ein Anstieg der Rauheit hauptsächlich unterhalb des Grenzwinkels beobachtet werden, während bei den lichtbogengespritzten Schichten ein linearer Anstieg über den gesamten Messbereich auftritt.

Zwischen den Flanken der „Sägezähne“ bilden sich Bereiche, die bei kleinen Spritz-

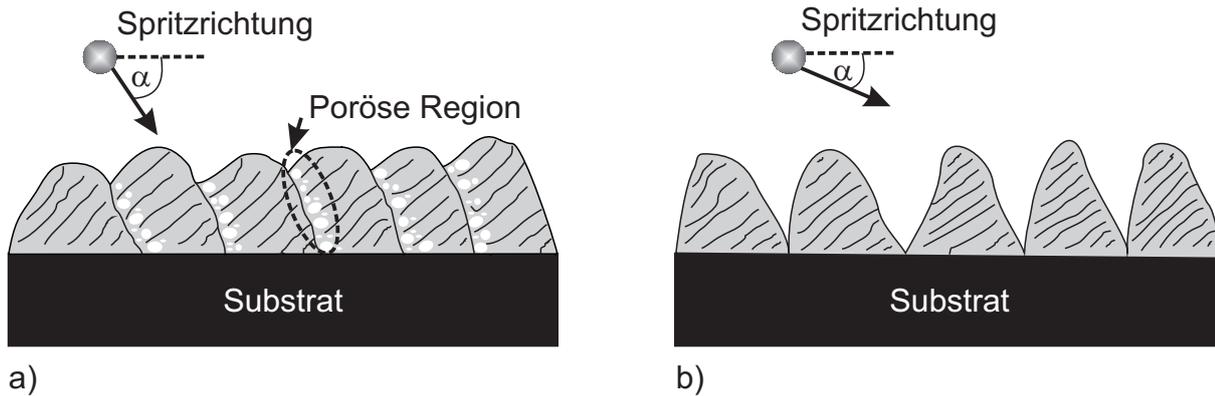


Abbildung 6.11: Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Spritzwinkel und Schichtstruktur von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten. a) Poröse Regionen in abgeschatteten Bereichen bei $\alpha \geq 50^\circ$, b) Einzelne Schichtaufwerfungen bei $\alpha < 50^\circ$

winkeln gegenüber dem Spritzstrahl abgeschattet werden [SN94, ZS01, Lon04c]. Hier bilden sich Makroporen in der Größenordnung der Partikeldurchmesser. Mit abnehmendem Spritzwinkel verstärkt sich dieser Effekt und folglich steigt die Anzahl der Poren an. Die plasmagespritzten WC-12Co Schichten zeigen ein Wachstum von Makroporen ab einem Spritzwinkel von 60° . Ab diesem Winkel lassen sich deutlich größere Poren erkennen und die Gesamtanzahl der Poren steigt an. Bei den lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten spiegelt sich dieser Effekt in der Rauheit und der Porosität der Schichten wieder. Mit abnehmendem Spritzwinkel verkippeln die Schichtlamellen senkrecht zur Spritzrichtung und wachsen dadurch aus der Schichtoberfläche heraus. Dies führt zu einem Anstieg der Rauheit und zu einer Abschattung der Bereiche hinter den Rauheitsspitzen. Es überlagert sich dadurch eine Wellenstruktur mit der Schichtrauheit, deren Periode mit abnehmendem Spritzwinkel zunimmt. Besonders die Bereiche zwischen zwei Wellenbergen weisen durch den Abschattungseffekt poröse Regionen auf (Abbildung 6.11a). Genau wie bei den plasmagespritzten WC-12Co Schichten lassen sich hier Makroporen erkennen. Bei einem Spritzwinkel unterhalb von 50° ist die Periode der Wellenstruktur derart groß, dass einzelne Schichtaufwerfungen entstehen (Abbildung 6.11). Die Hohlräume zwischen den Schichtaufwerfungen werden messtechnisch nicht erfasst und folglich wird ein Abfall der Porosität gemessen. Vergleichbare Änderungen der Schichtmikrostruktur, der Schichttopographie sowie der Schichtauftragung bei einer Verringerung des Spritzwinkels wurden in verschiedenen Arbeiten beobachtet [AOMY86, IKN99, TMC05b, KNY06, KNY07].

Beide Schichtsysteme weisen bei allen Spritzwinkeln nur geringe statistische Schwankungen der Mikrohärtigkeit auf, die sich auf das inhomogene, mehrphasige Schichtgefüge der Spritzschichten zurückführen lassen. Nur an den lichtbogengespritzten

Schichten wird ein geringer Abfall der Schichthärte unterhalb von 50° beobachtet. Diese Ergebnisse zeigen, dass keine oder nur geringfügige Phasenänderungen bei einer Verkippung der Spritzpistole auftreten. Eine Änderung der Phasenzusammensetzung bei verschiedenen Spritzwinkeln wäre auch nicht zu erwarten gewesen, da die sich in der Spritzschicht ausbildenden Phasen hauptsächlich durch die thermodynamischen Vorgänge in der Spritzflamme beeinflusst werden. In einigen Arbeiten wurde ein Abfall der Schichthärte bei einer Verringerung des Spritzwinkels gemessen [SRR01, HKZ10, GCF10]. In diesen Arbeiten wurde die Härte allerdings mit höheren Lasten ermittelt, so dass Veränderungen der Schichtstruktur, wie eine Änderung der Porosität, in das Messergebnis einfließen. Dagegen wird bei den hier durchgeführten Mikrohärtmessungen ausschließlich die Härte einzelner Phasen bestimmt.

6.2 Spritzabstand

Beim Thermischen Spritzen wird in den meisten Fällen mit einem festen Spritzabstand beschichtet. Der Spritzabstand wird in der Regel am Optimalwert konstant gehalten und es werden andere Parameter des Spritzprozesses variiert. Allerdings stellt der Spritzabstand eine interessante Größe für die Bahnplanung bei der Beschichtung komplexer Oberflächen dar, da er in einem Beschichtungsprozess unkompliziert abgeändert werden kann, ohne dass eine neue Bahnplanung vorgenommen werden muss. Zudem erfordern bestimmte Bauteilgeometrien eine Abweichung des Spritzabstandes vom Optimalwert. Im Folgenden wird daher der Einfluss des Spritzabstandes auf die Schichtdicke und -qualität des atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co und des lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichtsystems vorgestellt und anschließend diskutiert.

6.2.1 Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co

Die Eigenschaften der atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten werden signifikant durch den Spritzabstand beeinflusst. Es werden mikrostrukturelle Änderungen des Schichtgefüges beobachtet, die mit einer Änderung des Schichtauftrags und der Schichttopographie einhergehen.

Im Intervall von 80 mm bis 150 mm führt eine Vergrößerung des Spritzabstandes zu einem Absinken der Auftragsrate (Abbildung 6.12a). Der Verlauf der Auftragsrate konnte mit einer empirisch ermittelten, linearen Funktion, angepasst werden, die den Abfall der Auftragsrate mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,84$ beschreibt:

$$A_{WC-12Co}(S) = 27,68 - 0,07S, S \in [80; 150] \quad (6.5)$$

Hierbei ist $A_{WC-12Co}$ [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$] die Auftragsrate und S [mm] der Spritzabstand. Außerhalb der Grenzen der mathematischen Anpassung zeigt die Auftragsrate ein stark nichtlineares Verhalten. Unterhalb von 80 mm fällt die Auftragsrate von $22,35 \pm 1,37 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ auf $20,67 \pm 1,56 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 50 mm. Oberhalb von 150 mm tritt ein Anstieg von $16,97 \pm 0,85 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ auf $20,93 \pm 0,36 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 180 mm auf.

Die Porosität der Spritzschichten als Funktion des Spritzabstandes ist in Abbildung 6.12b dargestellt. Bei einer Vergrößerung des Spritzabstandes fällt die Porosität degressiv von $17,33 \pm 2,58\%$ bei 50 mm auf $10,13 \pm 0,90\%$ bei 180 mm ab. Zwischen 50 mm und 110 mm wird zunächst ein steiles Absinken der Porosität beobachtet, wohingegen unterhalb von 110 mm sich die Porosität dagegen nur noch geringfügig ändert.

Die Mikro- und Kleinlasthärte der WC-12Co Schichten steigt mit zunehmendem Spritzabstand an (6.12c, d). Die Spritzschichten weisen unterhalb von 90 mm eine sehr geringe Mikrohärtigkeit von $720 \pm 146 HV_{0,1}$ auf. Zwischen 90 mm und 120 mm steigt die Mikrohärtigkeit steil auf $1088 \pm 170 HV_{0,1}$ an und bleibt oberhalb von 120 mm annähernd konstant. Bei 80 mm und 100 mm Spritzabstand zeigen sich zwei Ausreißer aus dem allgemeinen Trend. Hier wurden mit $1013 \pm 256 HV_{0,1}$ und $1140 \pm 208 HV_{0,1}$ zu hohe Härten gemessen. Die Ursache dafür ist die heterogene Ausprägung des Schichtgefüges. Die Kleinlasthärte der Spritzschichten steigt fast linear von $603 \pm 79 HV_{0,5}$ bei 50 mm auf $970 \pm 60 HV_{0,5}$ bei 180 mm an. Ein steiler Übergang der Härte bei mittleren Spritzabständen wird nicht beobachtet.

Die Rauheit R_z der Spritzschichten sinkt von $41,33 \pm 3,38 \mu\text{m}$ bei 50 mm auf $32,71 \pm 2,80 \mu\text{m}$ bei 180 mm ab (Abbildung 6.12e). Bis 110 mm tritt ein steiler Abfall der Rauheit auf, während unterhalb von 110 mm nur noch geringfügige Änderung der Schichtrauheit hervorgerufen werden.

In Abbildung 6.13 ist das Welligkeitsprofil der Spritzschichten dargestellt. Für die Herstellung von endkonturnahen Beschichtungen darf die Welligkeit der Spritzschichten nicht zu groß sein. Andernfalls weisen die Spritzschichten eine periodische Änderung der Schichtdicke auf, die eine maßgenaue Beschichtung verhindert. Die Spritzschichten bis zu einem Spritzabstand von 90 mm zeigen eine deutliche Wellenstruktur. Eine Verringerung des Spritzabstandes verkleinert die Periode der Welle und erhöht gleichzeitig deren Amplitude. Oberhalb von 90 mm lässt sich nur eine sehr gering ausgeprägte Wellenstruktur beobachten. Bei 115,85 mm sind die Schichten annähernd

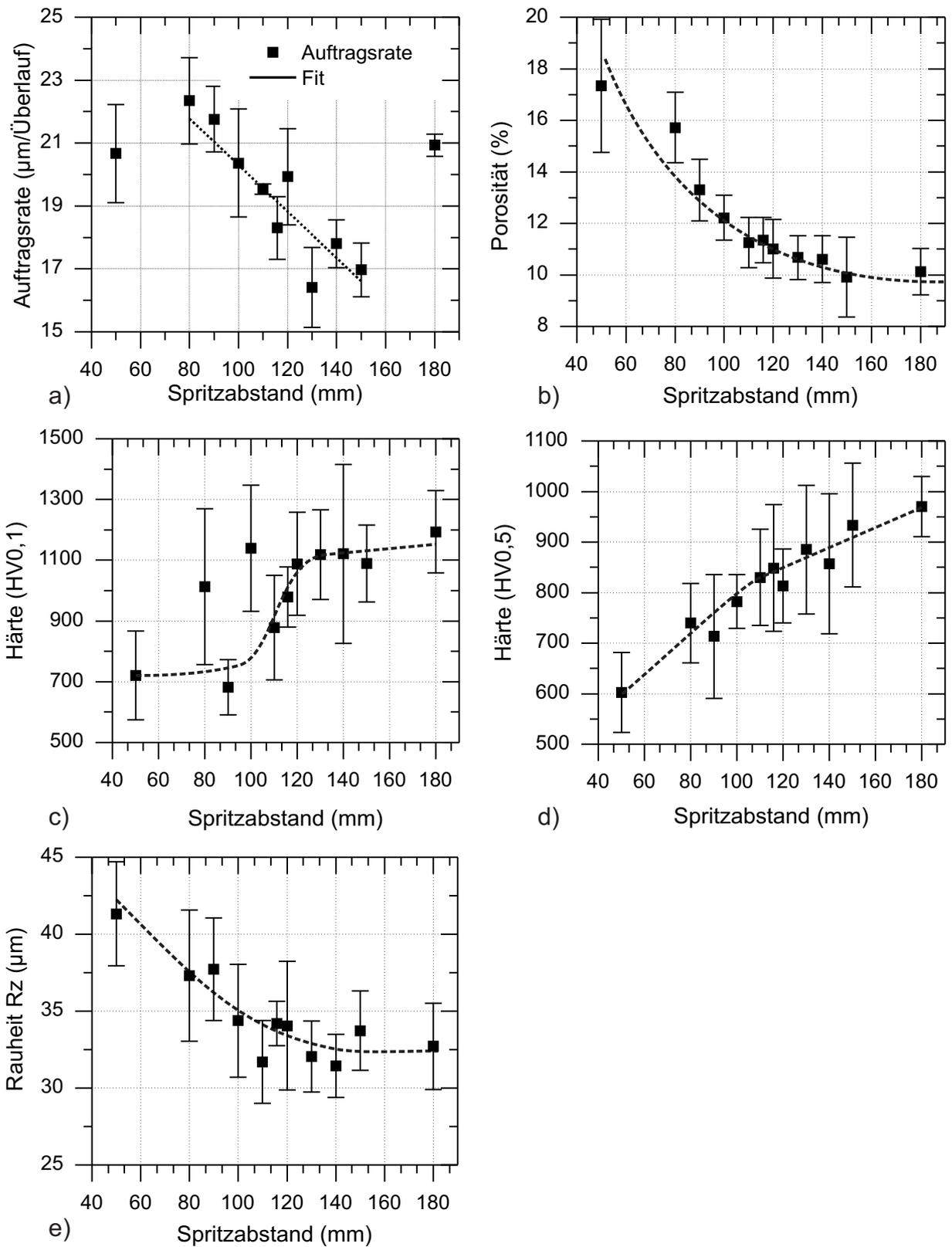


Abbildung 6.12: a) Auftragsrate, b) Porosität, c) Mikrohärtigkeit, d) Kleinlasthärtigkeit und e) Rauheit R_z als Funktion des Spritzabstandes für plasmagespritztes WC-12Co

glatt. Oberhalb von 115,85 mm nimmt die Charakteristik der Wellenstruktur nur noch geringfügig zu.

Anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen an Querschliffen wurde der Einfluss des Spritzabstandes auf die Mikrostruktur der Spritzschichten bestimmt. Bei einem Spritzabstand von 50 mm lassen sich vertikale Hitzerisse, quer durch das gesamte Schichtgefüge, beobachten, die oberhalb von 50 mm nicht mehr auftreten. Bis 100 mm weisen die Spritzschichten zusätzlich eine große Anzahl an Mikroporen ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$), sowie einige Makroporen ($\varnothing < 30 \mu\text{m}$), auf. Oberhalb von 100 mm sinkt die Anzahl der Mikroporen deutlich ab, während nur eine geringfügige Verringerung der Makroporen beobachtet wird. Ab 130 mm entstehen horizontale Risse zwischen den Schichtlamellen. In Abbildung 6.14 sind exemplarisch lichtmikroskopische Aufnahmen von WC-12Co Querschliffen bei den Spritzabständen 80 mm, 110 mm und 150 mm dargestellt.

6.2.2 Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe

Das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe zeigt ebenfalls eine Abhängigkeit der Schichteigenschaften von dem Spritzabstand. Die Auftragsrate sinkt mit zunehmendem Spritzabstand von $186,91 \pm 12,83 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 50 mm auf $169,73 \pm 17,95 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 180 mm ab (Abbildung 6.15a). Der Trend der Auftragsrate ist jedoch starken Schwankungen der Mittelwerte und hohen Standardabweichungen unterworfen. Eine Regression der Messdaten ist nur schwer durchführbar. Eine Anpassung mit verschiedenen mathematischen Funktionen führt jeweils zu sehr geringen Bestimmtheitsmaßen oder physikalisch nicht interpretierbaren Zusammenhängen. Für die Bahnplanung wurde daher das einfachste, physikalisch sinnvolle Modell, die Anpassung mit einer Ausgleichsgeraden, verwendet:

$$A_{WSC-Fe}(S) = 187,86 - 0,10S \quad (6.6)$$

Hierbei ist A_{WSC-Fe} [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$] die Auftragsrate und S [mm] der Spritzabstand. Die Anpassung hat allerdings nur ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,14$ und ist daher als unzureichend zu bewerten.

Die WSC-Fe Spritzschichten zeigen ein dichtes Schichtgefüge mit Porositäten kleiner als 4% über den gesamten Messbereich (Abbildung 6.16b). Die Porosität sinkt tendenziell bei einer Vergrößerung des Spritzabstandes von $3,22 \pm 1,31\%$ bei 50 mm auf $2,39 \pm 0,80\%$ bei 180 mm ab. Der Trend der Porosität ist allerdings stark nichtlinear.

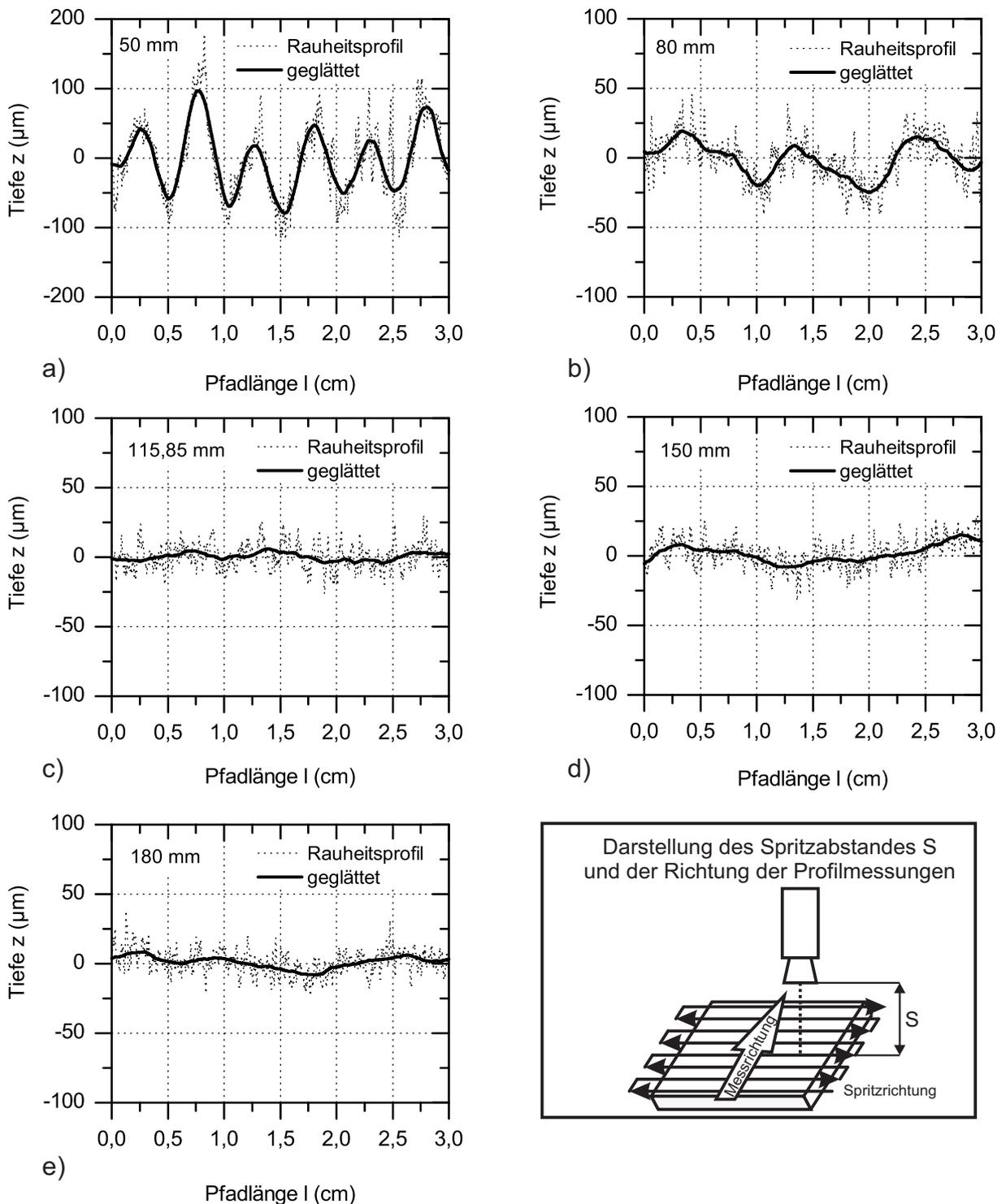


Abbildung 6.13: Darstellung des Oberflächenprofils von atmosphärisch plasmaspritzten WC-12Co Schichten, Spritzabstand S = a) 50 mm, b) 80 mm, c) 115,85 mm, d) 150 mm, e) 180 mm

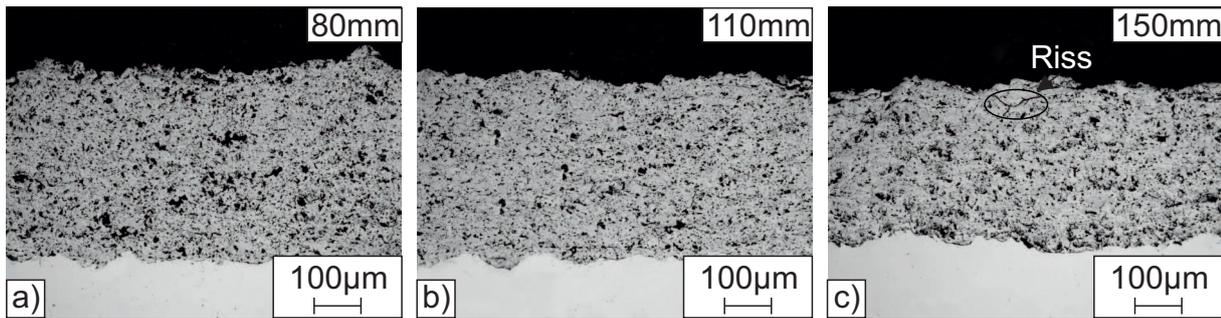


Abbildung 6.14: Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmaspritzten WC-12Co Schichten bei einem Spritzabstand von a) 80 mm, b) 110 mm und c) 150 mm

Gemessene Schwankungen der Schichtporosität können zum Teil auf einen systematischen Fehler der bildgestützten Porositätsmessung zurückgeführt werden.

Die Mikro- und Kleinlasthärte der Spritzschichten sinkt mit zunehmendem Spritzabstand ab (Abbildung 6.16c, d). Die Mikrohärtigkeit fällt von $817 \pm 342 \text{ HV}_{0,1}$ bei 50 mm auf $607 \pm 119 \text{ HV}_{0,1}$ bei 180 mm. Parallel dazu verringert sich die Kleinlasthärte von $614 \pm 68 \text{ HV}_{0,5}$ bei 50 mm auf $370 \pm 35 \text{ HV}_{0,5}$ bei 180 mm. Der allgemeine Trend ist ebenfalls starken Schwankungen der Mittelwerte und besonders bei der Mikrohärtigkeitsmessung hohen Standardabweichungen unterworfen.

Die Rauheit R_z der Spritzschichten sinkt von $59,67 \mu\text{m}$ bei 50 mm auf $44,18 \pm 3,24 \mu\text{m}$ bei 180 mm ab (Abbildung 6.15e). Insbesondere unterhalb von 80 mm zeigt sich ein deutlicher Anstieg und oberhalb von 150 mm ein steiler Abfall der Rauheit. Genau wie bei den anderen Messungen treten auch hier starke Schwankungen und hohe Standardabweichungen auf. Besonders die Rauheit bei 90 mm ist, bezogen auf den Trend, als zu hoch zu bewerten.

In Abbildung 6.16 ist das Welligkeitsprofil der lichtbogengespritzten Schichten bei einigen ausgewählten Spritzabständen dargestellt. Unterhalb von 90 mm steigt die Welligkeit der Spritzschichten an. Besonders zwischen 80 mm und 50 mm tritt ein deutlicher Anstieg der Amplitude der Welligkeit auf. Oberhalb von 90 mm bilden sich für einen Lichtbogenspritzprozess verhältnismäßig glatte Schichten und es wird nur noch ein geringfügiger Anstieg der Schichtwelligkeit beobachtet.

Lichtmikroskopische Aufnahmen an Querschliffen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten zeigen bei einem Spritzabstand von 50 mm stark ausgeprägte, horizontale Rissnetzwerke sowie einige vertikale Risse und ein stark lamellares, inhomogenes Schichtgefüge mit umgeschmolzenen und teils angeschmolzenen Karbideinschlüssen. Bis zu einem Spritzabstand von 100 mm nimmt die Anzahl an teilweise angeschmol-

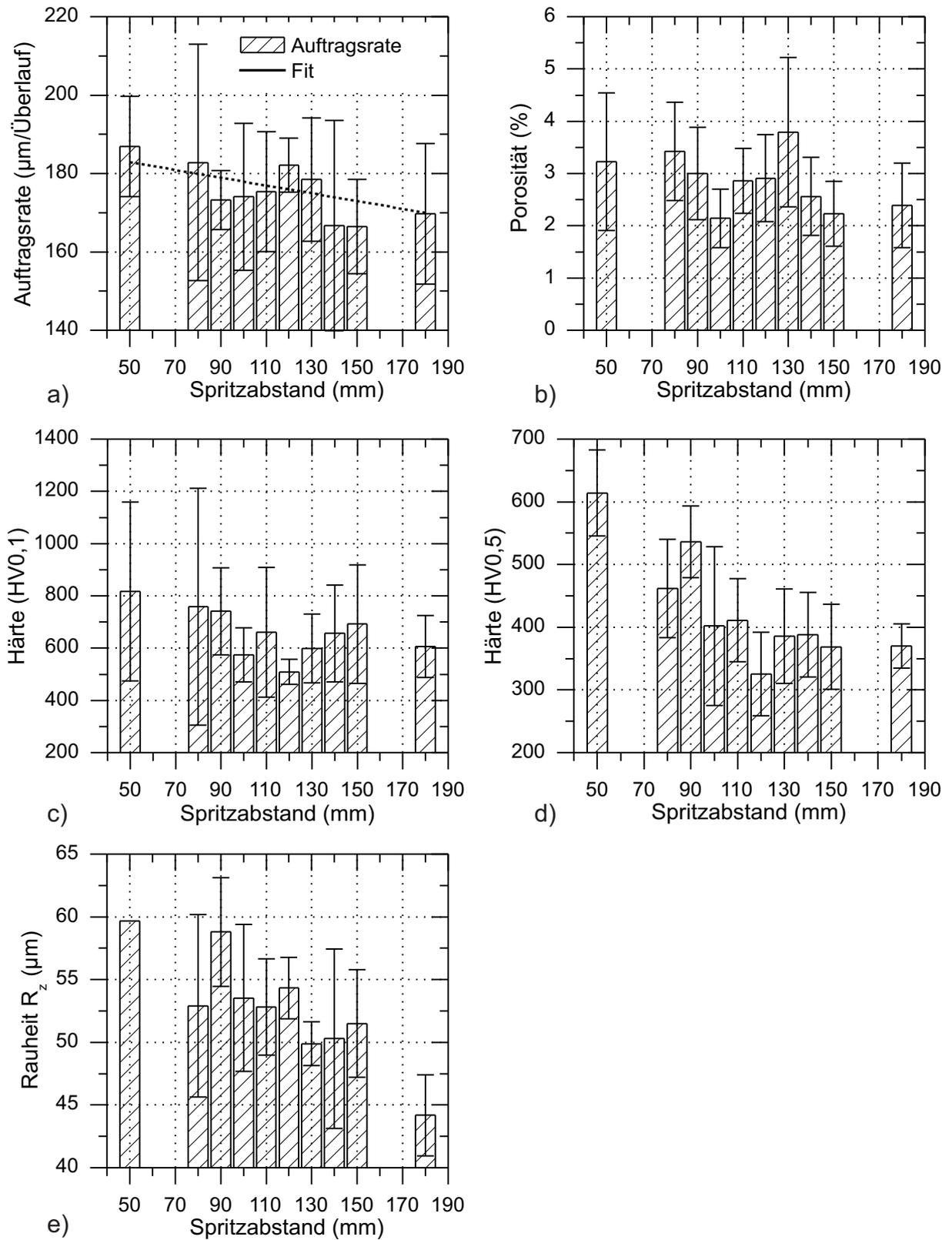


Abbildung 6.15: a) Auftragsrate, b) Porosität, c) Mikrohärtigkeit, d) Kleinlasthärtigkeit und e) Rauheit R_z als Funktion des Spritzabstandes für lichtbogengespritztes WSC-Fe

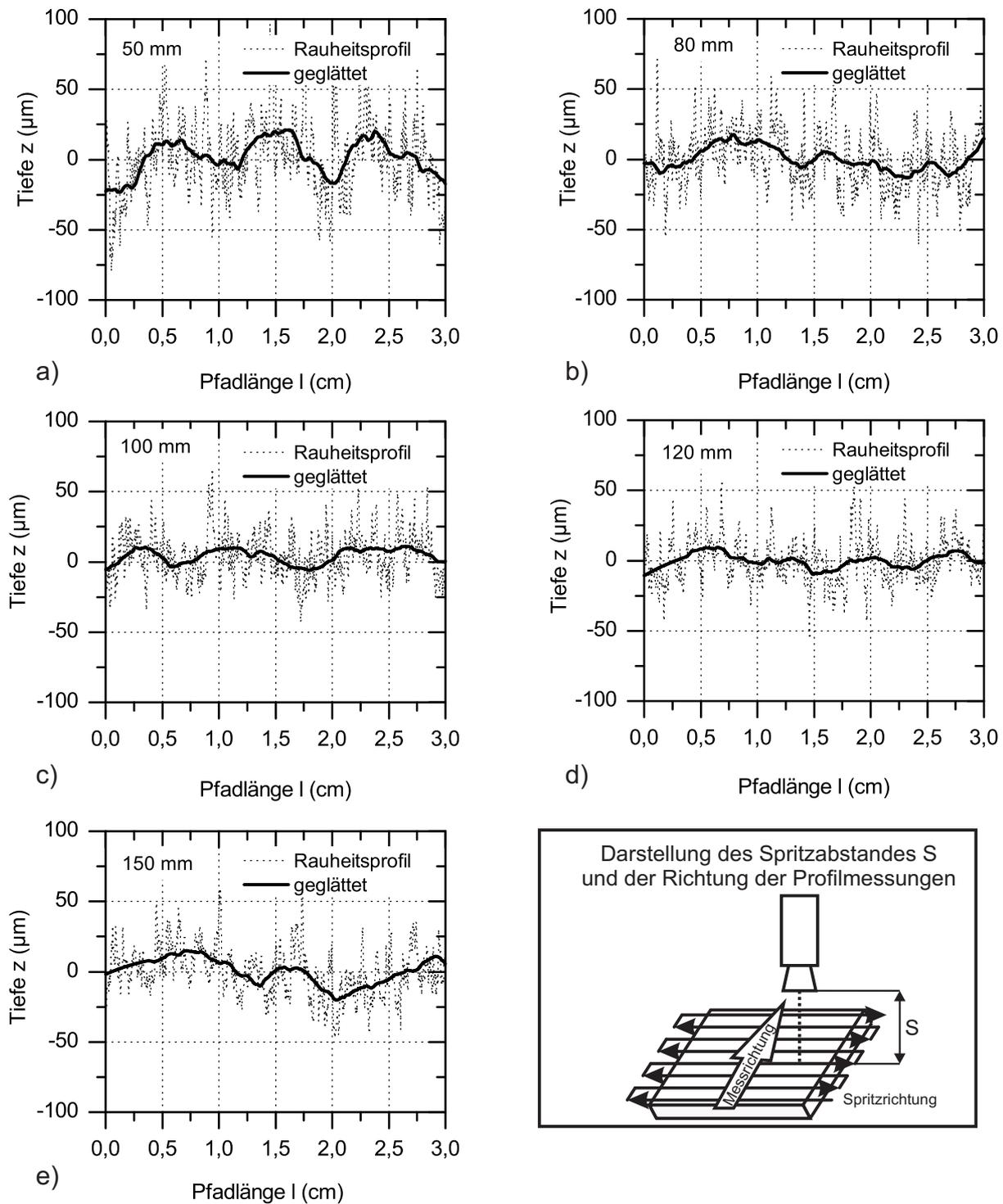


Abbildung 6.16: Darstellung des Oberflächenprofils von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten, Spritzabstand $S =$ a) 50 mm, b) 80 mm, c) 100 mm, d) 120 mm, e) 150 mm

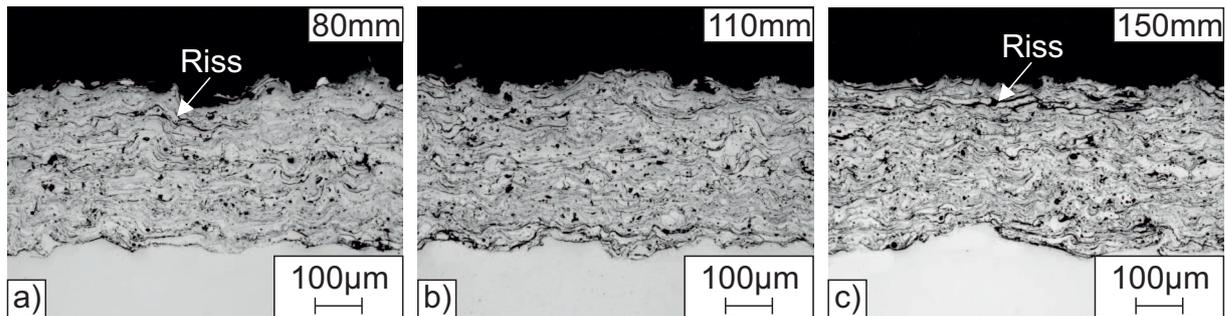


Abbildung 6.17: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei einem Spritzabstand von a) 80 mm, b) 110 mm und c) 150 mm

zenen Karbiden ab. Es werden vermehrt umgeschmolzene, abgeplattete Karbideinschlüsse in einer lamellaren Matrix beobachtet. Vertikale Risse treten oberhalb von 50 mm nicht mehr auf, die Anzahl an horizontalen Rissen nimmt ebenfalls deutlich ab. Zwischen 100 mm und 120 mm weisen die Schichten ein dicht gepacktes Gefüge mit einer nur sehr geringen Anzahl an Rissen auf. Oberhalb von 120 mm nimmt die Anzahl an horizontalen Rissen wieder zu und es treten vermehrt Oxidphasen in der Beschichtung auf. In Abbildung 6.17 sind repräsentative Aufnahmen bei den Spritzabständen 80 mm, 110 mm und 150 mm dargestellt.

6.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Der Spritzabstand hat einen signifikanten Einfluss auf die strukturellen Eigenschaften der atmosphärisch plasmagespritzten und der lichtbogengespritzten Schichtsysteme. Eine Vergrößerung des Spritzabstandes bewirkt primär einen Abfall der Schichtauftragsrate. Dieser Sachverhalt wurde anhand einer geometrischen Überlegung überprüft. Unter der Annahme, dass der Öffnungswinkel des Spritzstrahls bei einer Veränderung des Spritzabstandes konstant bleibt, steigt der Durchmesser der beschichteten Fläche, bei einem Überlauf über das Substrat, linear mit dem Spritzabstand an. In Bezug auf das gaußförmige Profil einer Spritzbahn bedeutet dieses Erkenntnis, dass bei einer Vergrößerung des Spritzabstandes ein linearer Anstieg der Halbwertsbreite auftritt. Wird weiterhin angenommen, dass der Auftragswirkungsgrad nicht durch Änderungen des Spritzabstandes beeinflusst wird, so muss die Fläche unter dem gaußschen Spritzprofil konstant bleiben. Diese Forderung wird erfüllt, wenn die Profilhöhe exponentiell mit zunehmendem Spritzabstand abfällt.

Unter Berücksichtigung dieser geometrischen Überlegungen, kann die theoretische Auftragsrate, durch eine Akkumulation der einzelnen gaußschen Spritzprofile im Abstand des Bahnabstandes, berechnet werden. Dieser Sachverhalt ist für das plas-

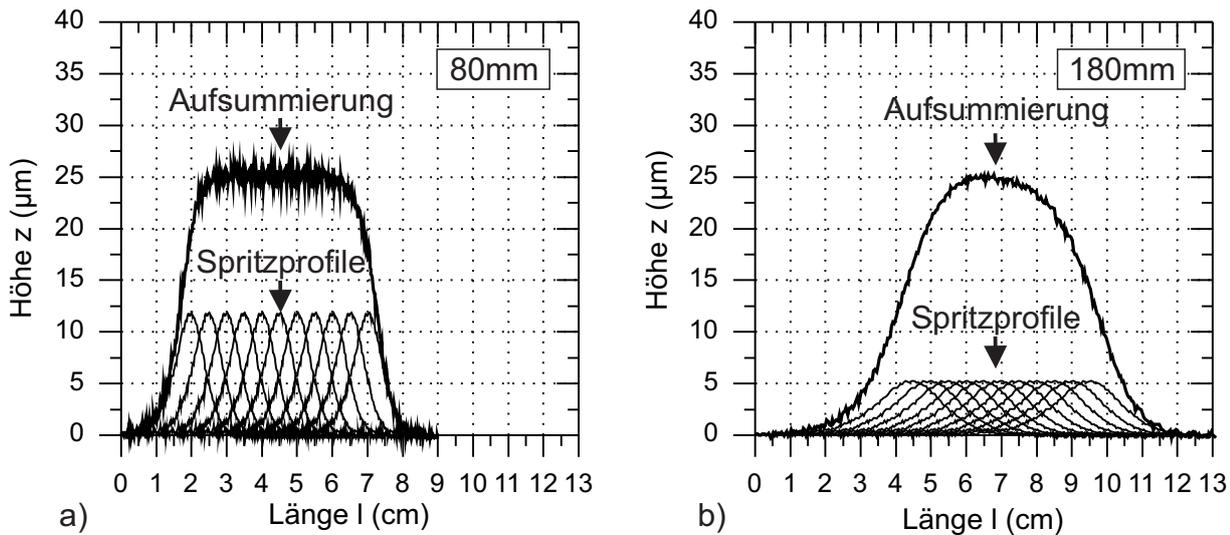


Abbildung 6.18: Theoretische Schichtdicke von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten bei den Spritzabständen a) 80 mm und b) 180 mm. Die Berechnung erfolgte anhand einer Akkumulation von einzelnen Spritzprofilen.

magespritzte WC-12Co Schichtsystem in Abbildung 6.18 dargestellt. Deutlich lässt sich erkennen, dass die maximale Höhe der akkumulierten Spritzprofile sowohl bei einem Spritzabstand von 80 mm, als auch bei einem Spritzabstand von 180 mm mit ca. $z = 25\mu\text{m}$ konstant bleibt. Der Abfall der Auftragsrate kann daher nicht auf die geometrischen Gegebenheiten im Spritzprozess zurückgeführt werden.

Abbildung 6.18 zeigt allerdings eine wichtige Randbedingung für die Bahnplanung. Mit zunehmendem Spritzabstand nimmt die Steigung an den Flanken des akkumulierten Schichtprofils ab. Das hat zur Folge, dass erst nach einer größeren Länge l (vgl. Abbildung 6.18) sich eine konstante Schichtdicke einstellt. Für die Praxis bedeutet dieser Effekt, dass bei der Bahnplanung um so mehr Mäanderbahnen vor die äußere Bauteilkante gelegt werden müssen, je größer der Spritzabstand ist. Andernfalls weist das Bauteil einen Abfall der Schichtdicke an den äußeren Bereichen auf. In dem hier simulierten Beispiel für das Schichtsystem WC-12Co mit einem Bahnabstand von 5 mm muss eine Länge $l = 0,5\text{ cm}$ bei einem Spritzabstand von 80 mm und eine Länge $l = 2\text{ cm}$ bei 180 mm überwunden werden, damit ein konstanter Schichtdickenverlauf auftritt. Das entspricht einer Anzahl von zwei respektive fünf Mäanderbahnen.

Ein klareres Verständnis der physikalischen Zusammenhänge bei der Beschichtung mit unterschiedlichen Spritzabständen liefern Messungen der Spritzpartikelgeschwindigkeit und -temperatur (Abbildung 6.19). Die Partikelgeschwindigkeit der atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Spritzpartikel sinkt ab einem Spritzabstand von 90 mm degressiv, bis zu einem Spritzabstand von 180 mm, ab. Unterhalb von 90 mm konnten aufgrund der hohen Strahlungsintensität der Plasmaflamme keine sinnvoll-

len Messwerte aufgenommen werden. Die lichtbogengespritzten WSC-Fe Spritzpartikel zeigen dagegen zwischen 50 mm und 90 mm einen steilen Anstieg der Partikelgeschwindigkeit. Oberhalb von 90 mm fällt die Partikelgeschwindigkeit wiederum langsam ab.

Mit zunehmendem Spritzabstand sinkt zudem die Temperatur der Spritzpartikel degressiv ab. Der Abfall der Partikeltemperatur kann bei beiden Schichtsystemen in guter Näherung durch exponentielle Funktionen beschrieben werden:

$$T_{WC-12Co}(S) = 16016,48 \cdot \exp\left(-\frac{S}{30,85}\right) + 2274,33 \quad (6.7)$$

$$T_{WSC-Fe}(S) = 690,13 \cdot \exp\left(-\frac{S}{53,75}\right) + 2168,49 \quad (6.8)$$

Hierbei ist $T_{WC-12Co}$ [°C] und T_{WSC-Fe} [°C] die Partikeltemperatur und S [mm] der Spritzabstand der Schichtsysteme. Beide Anpassungen konnten mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von $R_{WC-12Co}^2 = 0,96$ und $R_{WSC-Fe}^2 = 0,99$ durchgeführt werden und sind daher als physikalisch sinnvoll zu erachten. Vergleichbare Verläufe der Partikelgeschwindigkeit und -temperatur wurden ebenfalls von verschiedenen Arbeitsgruppen gemessen [SSM00, MR05, TVA⁺08b]. Verursacht wird der Anstieg der Partikelgeschwindigkeit und -temperatur durch die träge Masse und die spezifische Leitfähigkeit der Spritzzusätze. Als Folge dessen werden die Spritzzusätze nicht unmittelbar auf die maximale Geschwindigkeit und Temperatur beschleunigt bzw. erwärmt, sondern erst mit einer zeitlichen und örtlichen Verzögerung. Bei den gemessenen Werten liegen die Maximalwerte unterhalb des kleinsten gemessenen Spritzabstandes. Nur bei dem lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichtsystem kann ein Anstieg der Partikelgeschwindigkeit bis 90 mm beobachtet werden. Oberhalb der Maximalwerte verlieren die Spritzpartikel ihre kinetische und thermische Energie durch inelastische Stoßvorgänge mit der Umgebungsluft, sowie durch Konvektion und Wärmestrahlung. Folglich sinken die Partikelgeschwindigkeit und -temperatur ab.

Die thermo-kinetischen Vorgänge in der Spritzflamme beeinflussen direkt die Charakteristik der Spritzschichten. Bei sehr geringen Spritzabständen unterhalb von 50 mm treffen heiße Spritzpartikel mit geringer kinetischer Energie auf die Substratoberfläche auf und bilden locker gepackte Schichten. Das spiegelt sich in den Messwerten in hohen Schichtporositäten und -rauheiten wieder. Beim Aufprall der heißen Spritzpartikel auf die im Vergleich dazu kalte Substratoberfläche erstarren die Partikel schlagartig, kontrahieren dabei und als Folge bilden sich Zugeigenspannungen in der Beschich-

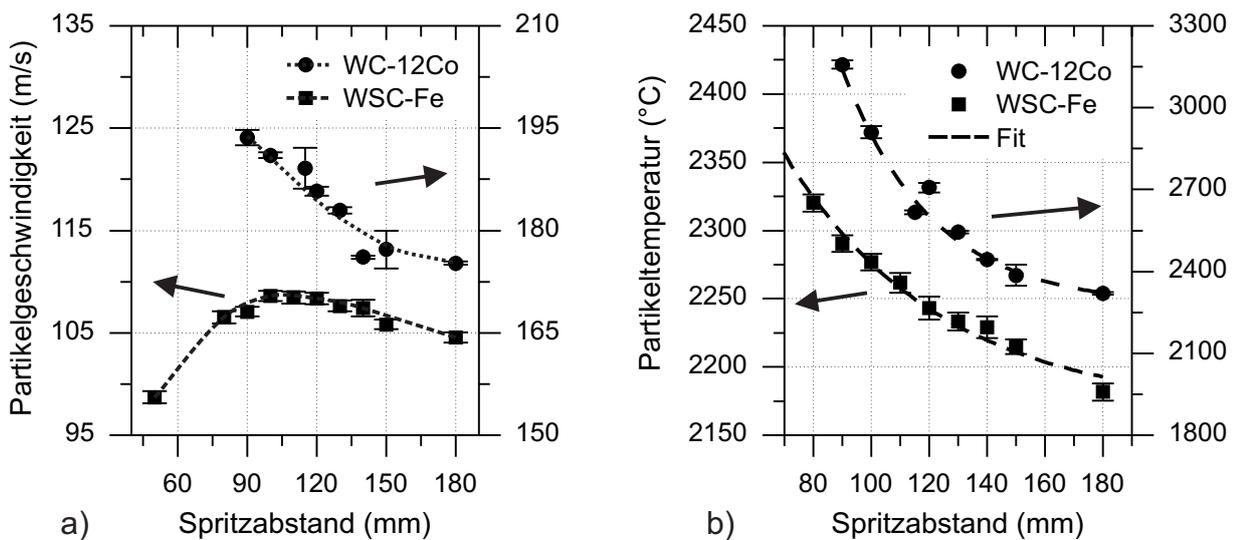


Abbildung 6.19: a) Partikelgeschwindigkeit und b) Partikeltemperatur als Funktion des Spritzabstandes für plasmagespritztes WC-12Co und lichtbogengespritztes WSC-Fe

tung. Überschreiten die Zugeigenspannungen die Bruchzähigkeit der Beschichtung, so tritt ein Spannungsbruch auf und es entstehen Risse im Schichtgefüge. Derartige Hitzerisse werden bei beiden Schichtsystemen bis zu einem Spritzabstand von 50 mm beobachtet. Beim atmosphärischen Plasmaspritzen dringt zusätzlich die Spritzflamme in die Substratoberfläche ein, überhitzt sie und verstärkt dadurch diesen Effekt. Korrespondierende Zusammenhänge werden in der Fachliteratur in verschiedenen Veröffentlichungen erläutert [FCVG88, ZG88, KSS91, AVM02, TMC05a, SALK08].

Oberhalb eines Spritzabstandes von 80 mm erreichen die Spritzpartikel ihre maximale Temperatur und beginnen langsam zu erstarren. Das hat zur Folge, dass beim Aufprall auf die Substratoberfläche die Spritzpartikel eine geringere mechanische Verklammerung eingehen und die Wahrscheinlichkeit ansteigt, dass Spritzpartikel von der Substratoberfläche zurückprallen. Dementsprechend wird ein Abfall der Auftragsrate gemessen. Vergleichbare Ergebnisse wurden ebenfalls von Trifa et al. [TMC07] und Arcondéguy et al. [AGM⁺08] ermittelt. Der Verlauf der Auftragsraten ist allerdings starken Schwankungen unterworfen, so dass mathematische Anpassungen nur mit einem geringen Bestimmtheitsmaß durchgeführt werden konnten. Dies gilt insbesondere für das Schichtsystem WSC-Fe. Die empirischen Modelle sind daher für die Bahnplanung mit dem Schichtsystem WC-12Co nur begrenzt einsetzbar und für das Schichtsystem WSC-Fe ungeeignet.

Eine Verlängerung des Spritzabstandes bewirkt, dass die Flugzeit der Partikel ansteigt und Diffusionsvorgänge sowie Phasenumwandlungen in den Spritzteilchen auf-

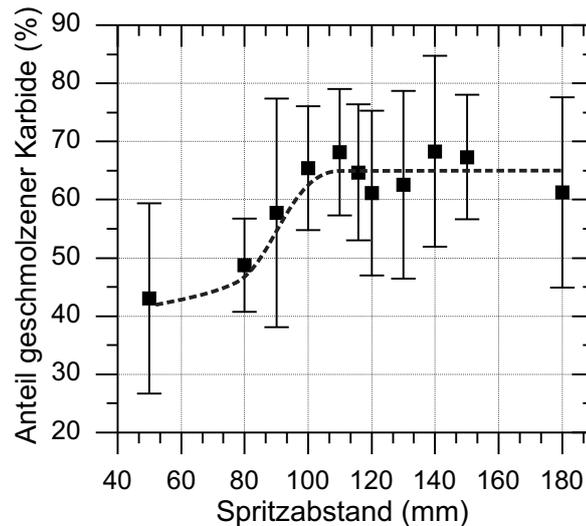


Abbildung 6.20: Mittels Rasterelektronenmikroskopie (Rückstreuelektronenmodus) ermittelter Anteil an geschmolzenen Karbiden im Schichtsystem WC-12Co als Funktion des Spritzabstandes

treten. Beim Aufprall auf das Substrat erstarren die Partikel dagegen in der Regel innerhalb weniger Mikrosekunden [LB02] und es finden nur noch sehr wenige chemische Reaktionen statt. Diese Tatsache zeigt sich in den gemessenen Härteverläufen der Spritzschichten. Die atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten weisen eine sprunghafte Veränderung der Mikrohärtigkeit zwischen Spritzabständen von 90 mm bis 120 mm auf. Das ist ein Indiz dafür, dass Phasenumwandlungen in den Spritzteilchen stattgefunden haben. Dieser Sachverhalt wurde genauer mittels Rasterelektronenmikroskopie überprüft. Im Rückstreuelektronenmodus wurden Aufnahmen der Beschichtungen gemacht und diese anhand bildanalytischer Software ausgewertet. So konnte ein qualitativer Verlauf des Anteils an geschmolzenen Karbiden in der Beschichtung ermittelt werden (Abbildung 6.20). Der Anteil an geschmolzenen Karbiden zeigt einen sprunghaften Übergang zu höheren Werten zwischen den Spritzabständen 80 mm und 120 mm. Der Verlauf korreliert somit mit den gemessenen Mikrohärtewerten.

Bei den lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten wurde dagegen nur ein geringer, jedoch signifikanter Abfall der Mikrohärtigkeit über den gesamten Messbereich ermittelt. Das deutet darauf hin, dass Phasenumwandlungen stattfinden, die in dem gemessenen Intervall noch nicht vollständig abgeschlossen sind. Dieser Sachverhalt konnte nicht mittels Rasterelektronenmikroskopie überprüft werden, da aufgrund des stark lamellaren und mehrphasigen Schichtgefüges keine sinnvollen Werte mit dieser Methode aufgenommen werden können.

Ein genaueres Bild der Phasenumwandlungen bei unterschiedlichen Spritzabständen

wurde anhand von röntgenographischen Phasenanalysen ermittelt (Abbildung 6.21). Die atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten zeigen bei einem Spritzabstand von 50 mm scharfe WC und Co Peaks, sowie geringer ausgeprägte W_2C und Co_3W_3C Peaks. Oberhalb von 115,85 mm lässt sich ein teilamorpher Bereich zwischen 2θ -Messwinkeln von 20° und 27° erkennen. Zusätzlich steigt die Intensität der W_2C und Co_3W_3C Peaks an. Diese Ergebnisse sind konform zu den Mikrohärtmessungen und dem gemessenen Anteil an geschmolzenen Karbiden. Damit kann unterstrichen werden, dass besonders zwischen den Spritzabständen 80 mm und 120 mm starke Phasenübergänge stattfinden. Durch die Bildung eines teilamorphen Bereiches und die verstärkte Ausprägung von W_2C und Co_3W_3C steigt die Mikrohärt der Spritzschichten deutlich an. Ein Anstieg der Mikrohärt bei der thermischen Zersetzung von WC-12Co wird in der Fachliteratur mehrfach beschrieben [SS86, FSH94]. Oberhalb von 120 mm sind die Spritzpartikel dagegen schon soweit abgekühlt, dass keine weiteren Phasenumwandlungen auftreten und dementsprechend keine signifikanten Änderungen der Mikrohärt gemessen werden.

Die WSC-Fe Schichten zeigen bei einem Spritzabstand von 50 mm charakteristische Reflexe von Fe und nicht stöchiometrischem WC_{1-x} , sowie Anteile an FeO, WC und W_2C . Eine Vergrößerung des Spritzabstandes bewirkt einen Anstieg der Fe und der FeO Reflexe, sowie relativ dazu, ein geringfügiges Absinken der WC_{1-x} und W_2C Peaks. Dies ist ein Indikator für vermehrt stattfindende Phasenübergänge bei größeren Spritzabständen in Verbindung mit einer thermischen Degradation des Wolframschmelzkarbids und der Ausbildung der oxidischen Phase FeO. Allerdings zeigt sich in den röntgenographischen Messungen, genau wie in den Mikrohärtmessungen, kein derart eindeutiger Trend wie bei dem WC-12Co. Verursacht wird dies durch die geringeren Partikeltemperaturen im Lichtbogenspritzprozess im Vergleich zu dem atmosphärischen Plasmaspritzprozess (vgl. Abbildung 6.19), wodurch auch Phasenübergänge in geringerem Umfang auftreten.

Zusätzlich haben die thermischen Eigenschaften der Spritzzusätze einen Einfluss auf die Reaktivität der Spritzteilchen. WC-12Co hat eine höhere Wärmeleitfähigkeit und eine geringere Wärmekapazität als WSC-Fe [San08]. Folglich nehmen die WC-12Co Spritzteilchen schneller Wärme aus der Flamme auf, kühlen aber gleichzeitig auch schneller wieder ab, so dass bei einem Spritzabstand von 120 mm nicht mehr genug thermische Energie für Phasenumwandlungen bereitsteht. Die WSC-Fe Spritzteilchen verlieren aufgrund ihrer höheren Wärmekapazität langsamer ihre Wärme und Phasenreaktionen finden auch noch bei größeren Spritzabständen statt.

Die vermehrt stattfindenden Phasenumwandlungen der Spritzpartikel bei größeren

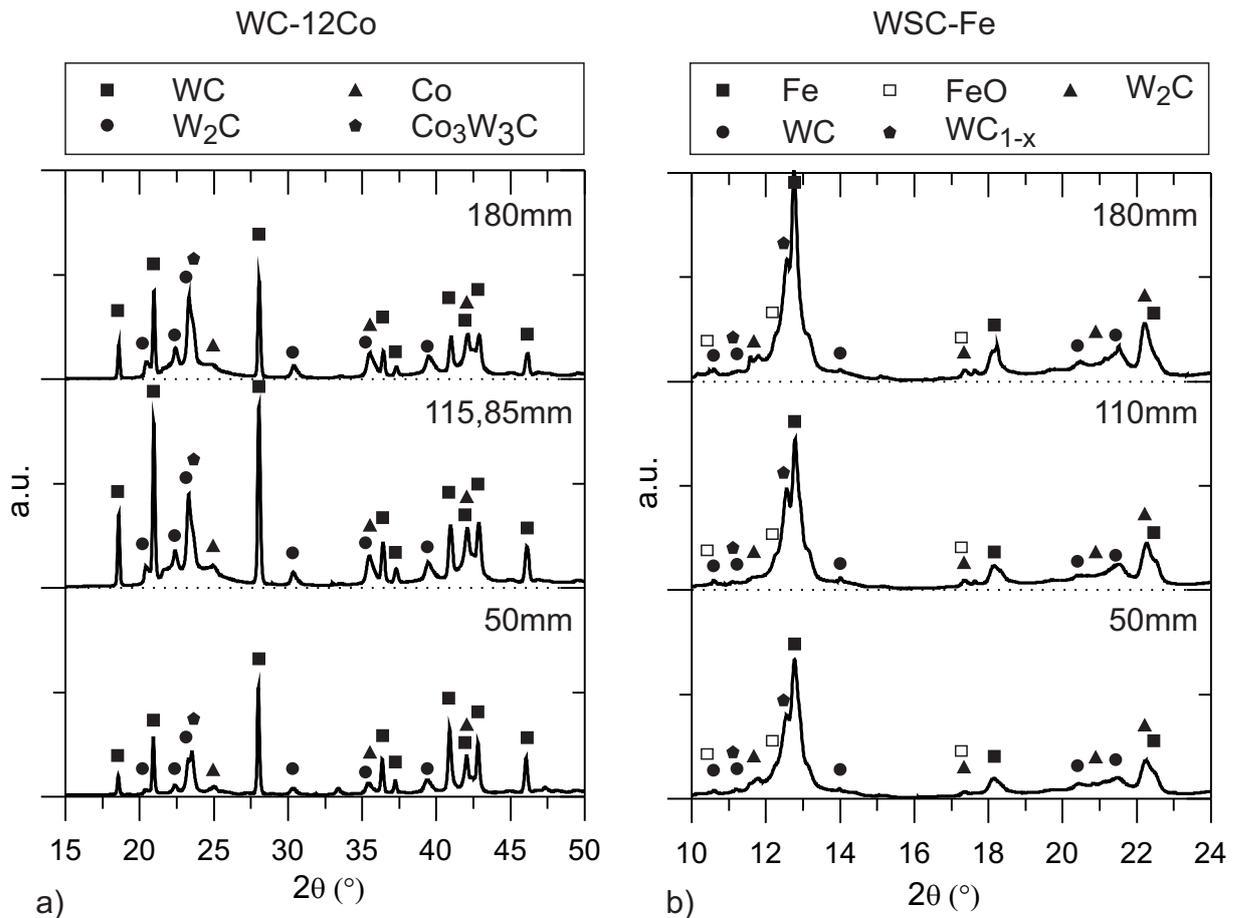


Abbildung 6.21: Röntgenographische Phasenanalyse der Schichtsysteme a) WC-12Co und b) WSC-Fe bei verschiedenen Spritzabständen

Spritzabständen gehen einher mit einer Verringerung der Schichtporosität. Das ist ein typisches Charakteristikum von Thermischen Spritzschichten und wird beispielsweise von de Villiers Lovelock berichtet. [VL98]. Dieser Zusammenhang kann besonders anhand der WC-12Co Schichten verdeutlicht werden. Unterhalb eines Spritzabstandes von 120 mm wird ein steiles Absinken der Schichtporosität der WC-12Co Schichten gemessen. Dagegen verringert sich oberhalb von 120 mm, nach Abschluß der Phasenumwandlung, die Schichtporosität nur noch geringfügig. Zusätzlich zeigen lichtmikroskopische Aufnahmen an Querschliffen, dass bei einer Vergrößerung des Spritzabstandes hauptsächlich Mikroporen im Schichtgefüge geschlossen werden, während die Anzahl an Makroporen nur unerheblich absinkt. Dieser Sachverhalt lässt darauf schließen, dass innerhalb der Spritzteilchen Diffusionsvorgänge stattfinden, die ein Absinken der Mikroporosität bewirken. Fehlstellen im Schichtgefüge hingegen, die sich in einer Makroporosität äußern, werden durch diese Vorgänge nicht beeinflusst. Bei den WSC-Fe Schichten hat ein weiterer Effekt einen Einfluss auf die Schichtporosität. Mit zunehmendem Spritzabstand bilden sich vermehrt Eisenoxide, die in Form

dunkelgrauer Phasen in den Querschliffen beobachtet werden. Eisenoxide haben einen geringeren Schmelzpunkt als reines Eisen und bleiben daher länger in der flüssigen Phase, so dass Diffusionsvorgänge über ein größeres Intervall stattfinden, wodurch Poren der Beschichtung geschlossen werden [AAMD09]. Vergleichbare Ergebnisse wurden ebenfalls von Arata et al. ermittelt [AOMY86].

Mit einem Absinken der Schichtporosität geht auch ein Abfall der Rauheit der Schichten einher. Die sich durch Diffusionsvorgänge schließenden Poren bewirken eine Homogenisierung des Schichtgefüges, die sich bis zu der Schichtoberfläche fortsetzt und zu einer Verringerung der Schichtrauheit führt. Die Schichtrauheit wird jedoch zusätzlich durch einen weiteren, geometrischen Effekt beeinflusst. Bei kleinen Spritzabständen akkumulieren sich Unebenheiten des Spritzprofils stärker als bei großen Spritzabständen. Als Folge weist die Beschichtung eine höhere Rauheit auf. Dieser Effekt lässt sich anhand der theoretischen Schichtprofile in Abbildung 6.18 erkennen.

Die Kleinlasthärtemessungen stellen im Gegensatz zu den sehr punktuellen Mikrohärtmessungen, eine Mittelung über einen größeren Schichtbereich dar. Dementsprechend gehen in die Kleinlasthärtemessungen Inhomogenitäten der Schichtmikrostruktur ein. Ein bekanntes Phänomen ist der Anstieg der Kleinlasthärte bei einem Absinken der Schichtporosität, wie es bei dem WC-12Co Schichtsystem beobachtet wurde [TMC07, VSY⁺09]. Das Absinken der Kleinlasthärte bei den WSC-Fe Schichten hingegen resultiert zum großen Teil aus den vermehrt stattfindenden Phasenumwandlungen bei größeren Spritzabständen. Diese haben ein stärker umgeschmolzenes Schichtgefüge zur Folge. Zusätzlich wird die Kleinlasthärte, durch horizontalen Risse im Schichtgefüge, die sich ab 130 mm bilden, beeinflusst. Dadurch verringert sich die interlamellare Haftung im kohäsive Schichtverbund und die Kleinlasthärte sinkt ab.

Der Anstieg der Schichtwelligkeit unterhalb eines Spritzabstandes von 80 mm kann auf die geometrischen Randbedingungen im Spritzprozess zurückgeführt werden. Eine Verringerung des Spritzabstandes führt zu einem linearen Absinken der Halbwertsbreite des Schichtprofils. Dadurch überlagern sich die Spritzprofile nicht mehr gleichmäßig zu einer konstanten Schichtdicke. Es entsteht ein wellenförmiges Profil, dessen Amplitude mit abnehmendem Spritzabstand zunimmt und dessen Periode gleichzeitig abnimmt. Dem kann nur durch das Anpassen des Bahnabstandes an den jeweiligen Spritzabstand entgegengewirkt werden.

6.3 Bahnabstand

Beim Einsatz der Thermischen Spritztechnik werden Bauteile in der Regel mit mäanderförmigen Spritzbahnen beschichtet (vgl. Kapitel 2.5.3). Der Abstand zwischen zwei Spritzbahnen wird dabei auf der gesamten Bauteiloberfläche konstant gehalten. Bei komplexen Oberflächen geschieht dies durch eine Projektion des Mäanders auf die Bauteiloberfläche. Eine Veränderung des Bahnabstandes auf der Bauteiloberfläche zur Anpassung der Beschichtung an die Bauteilgeometrie wird in der Fachliteratur nicht erwähnt. Trotzdem kann durch eine Variation des Bahnabstandes die Schichtdicke in weiten Bereichen verändert werden. Allerdings kann dies nicht in beliebigen Grenzen geschehen, da bei sehr großen Bahnabständen die einzelnen Spritzprofile nicht mehr adäquat überlappen und sich dadurch eine wellige Schichtkontur einstellt. Im Folgenden wird der Einfluss des Bahnabstandes auf die Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten für atmosphärisch plasmagespritzte WC-12Co und lichtbogen-gespritzte WSC-Fe Schichtsysteme untersucht und im Anschluss diskutiert.

6.3.1 Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co

Der Bahnabstand hat einen signifikanten Einfluss auf die Auftragsrate des Schichtsystems WC-12Co (Abbildung 6.12a). Eine Vergrößerung des Bahnabstandes führt zunächst zu einem starken Absinken der Auftragsrate von $28,05 \pm 1,12 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 3 mm auf $11,76 \pm 1,15 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 7 mm und danach zu einem flacheren Abfall auf $8,64 \pm 1,61 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 11 mm. Der degressive Verlauf der Auftragsrate kann in sehr guter Näherung durch eine Hyperbel beschrieben werden:

$$A_{WC-12Co}(B) = 82,58 \cdot B^{-0,98} \quad (6.9)$$

Hierbei ist $A_{WC-12Co}$ [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$] die Auftragsrate und B [mm] der Bahnabstand. Die Anpassung der Funktion an die Messwerte konnte mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 1,00$ durchgeführt werden und ist daher als sehr gut zu bewerten.

Die Schichtporosität wird nur geringfügig durch eine Änderung des Bahnabstandes beeinflusst (Abbildung 6.12b). Sie schwankt zwischen einem Minimalwert von $9,08 \pm 1,51 \%$ bei 11 mm und einem Maximalwert von $10,75 \pm 2,45 \%$ bei 9 mm. Diese Unregelmäßigkeit im Porositätsverlauf liegt im Rahmen der Messgenauigkeit. Der Einfluss des Bahnabstandes auf die Schichtporosität ist daher zu vernachlässigen.

Die Spritzschichten weisen bei allen Bahnabständen hohe Mikrohärtigkeiten zwischen $1067 \pm 124 HV_{0,1}$ bei 5 mm und $1205 \pm 193 HV_{0,1}$ bei 3 mm auf (6.12c). Eine eindeutige Wechselbeziehung zwischen dem Bahnabstand und der Mikrohärtigkeit lässt sich nicht erkennen. Die Kleinlasthärte der WC-12Co Schichten verringert sich dagegen stetig mit zunehmendem Bahnabstand (6.12d). Bei 3 mm weisen die Schichten eine Kleinlasthärte von $799 \pm 100 HV_{0,5}$ auf, die annähernd linear bis $679 \pm 105 HV_{0,5}$ bei 11 mm abfällt. Sowohl die Mikro- als auch die Kleinlasthärtemessungen sind zum Teil hohen Standardabweichungen unterworfen, die ein Resultat der inhomogenen Schichtstruktur sind.

Die Rauheit R_z der Spritzschichten bleibt annähernd konstant zwischen den Bahnabständen 5 mm und 11 mm (Abbildung 6.12e). Geringfügige Schwankungen der Rauheit zwischen den Extremwerten $32,16 \pm 3,76 \mu m$ bei 5 mm und $33,99 \pm 4,74 \mu m$ bei 9 mm können auf Ungenauigkeiten des taktilen Messverfahrens zurückgeführt werden. Unterhalb eines Bahnabstandes von 5 mm zeigt sich jedoch ein charakteristischer Anstieg der Schichtrauheit auf $36,49 \pm 4,14 \mu m$.

Das Welligkeitsprofil der atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten ist in Abbildung 6.23 dargestellt. Im Intervall von 3 mm bis 7 mm Bahnabstand bilden sich Schichten mit einer ebenen, relativ glatten Oberfläche. Dagegen weisen die Messprofile oberhalb von 7 mm eine wellige Kontur auf. Die Amplitude und die Periode der Welligkeit steigen mit zunehmendem Bahnabstand an. Dadurch zeigen sich besonders bei einem Bahnabstand von 11 mm deutliche Schwankungen der Schichtoberfläche mit Abweichungen teilweise oberhalb von $50 \mu m$.

In Abbildung 6.24 sind lichtmikroskopische Aufnahmen der atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten dargestellt. Die Querschliffe weisen bei allen Bahnabständen ein relativ inhomogenes Schichtgefüge mit ungeschmolzenen und teilgeschmolzenen Karbiden sowie komplett umgeschmolzenen Regionen auf. In dem Schichtaufbau liegen Mikroporen ($\varnothing < 10 \mu m$) sowie einige wenige Makroporen ($\varnothing < 30 \mu m$) statistisch verteilt vor. Teilweise lassen sich horizontale Risse im Schichtgefüge erkennen. Deutliche mikrostrukturelle Änderungen bei einer Vergrößerung des Bahnabstandes treten nicht auf. Es lässt sich eine leichte Tendenz beobachten, dass mit zunehmendem Bahnabstand die Anzahl an Makroporen ansteigt.

6.3.2 Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe

Das Schichtsystem WSC-Fe zeigt einen degressiven Abfall der Auftragsrate bei einer Vergrößerung des Bahnabstandes (Abbildung 6.25a). Die Auftragsrate sinkt zunächst

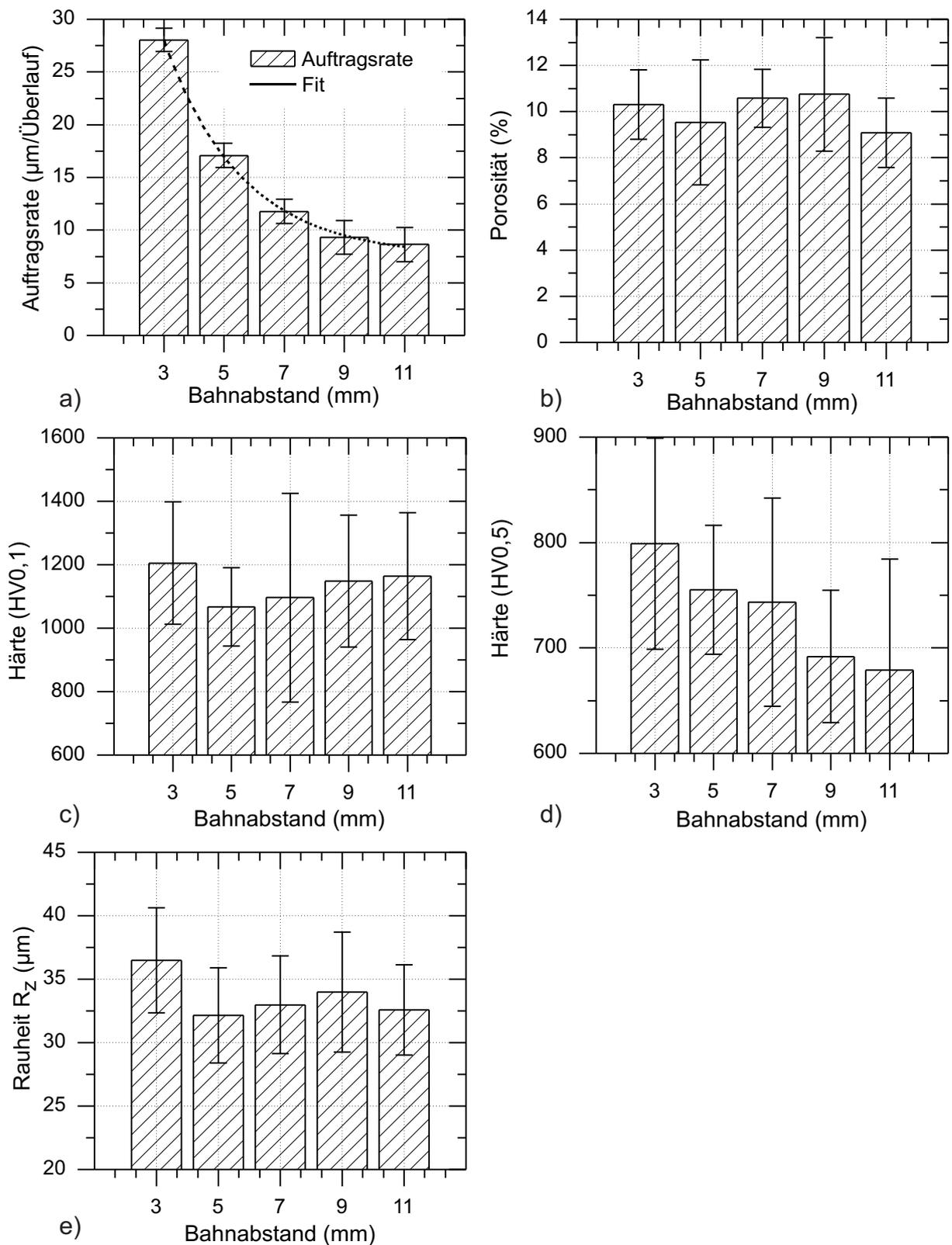


Abbildung 6.22: Einfluss des Bahnabstandes auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_z von plasmagespritzten WC-12Co Schichten

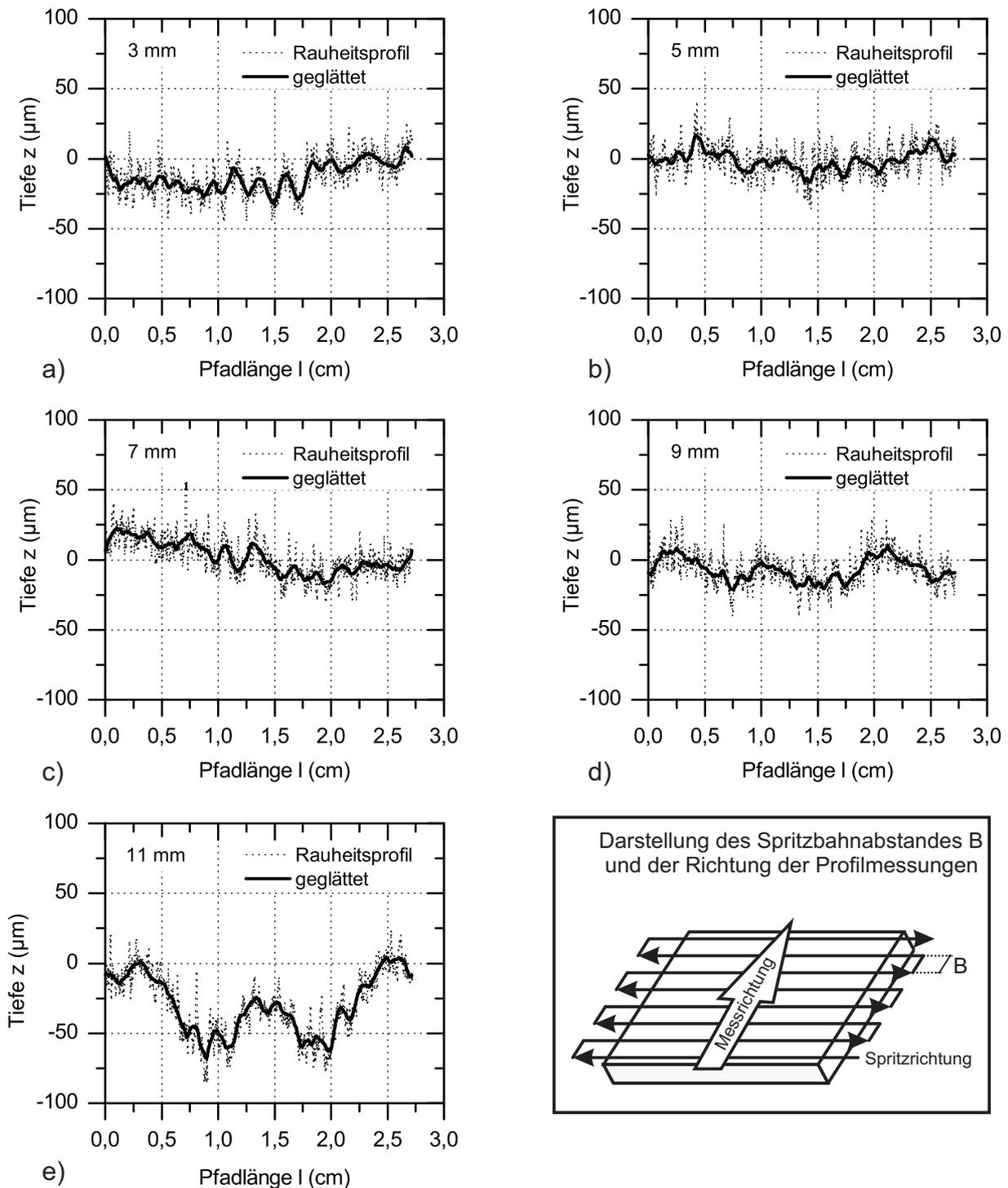


Abbildung 6.23: Darstellung des Oberflächenprofils von plasmagespritzten WC-12Co Schichten, Bahnabstand B = a) 3 mm, b) 5 mm, c) 7 mm, d) 9 mm, e) 11 mm

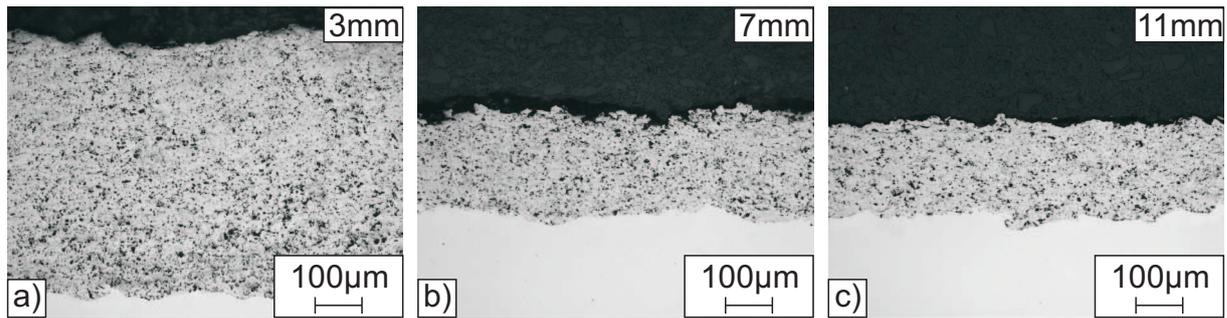


Abbildung 6.24: Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmaspritzten WC-12Co Schichten bei einem Bahnabstand von a) 3 mm, b) 7 mm und c) 11 mm

steil von $298,33 \pm 22,70 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 3 mm auf $126,21 \pm 17,76 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 7 mm ab. Unterhalb von 7 mm wird nur noch eine geringfügige Verringerung der Auftragsrate auf $81,82 \pm 12,73 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 11 mm beobachtet. Der Verlauf der Auftragsrate kann in sehr guter Näherung durch eine Hyperbel beschrieben werden:

$$A_{WSC-Fe}(B) = 852,77 \cdot B^{-0,97} \quad (6.10)$$

Hierbei ist A_{WSC-Fe} [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$] die Auftragsrate und B [mm] der Bahnabstand. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung beträgt $R^2 = 1,00$.

Die Porosität der Spritzschichten steigt mit zunehmendem Bahnabstand zunächst geringfügig von $1,81 \pm 0,28 \%$ bei 3 mm auf $2,55 \pm 0,45 \%$ bei 7 mm an. Oberhalb von 7 mm wird ein steiler Anstieg der Schichtporosität auf $3,98 \pm 1,36 \%$ bei 9 mm und $4,32 \pm 0,74 \%$ bei 11 mm beobachtet (Abbildung 6.25b).

Die Mikrohärtigkeit der lichtbogengespritzten Schichten zeigt keine Abhängigkeit von dem Bahnabstand (Abbildung 6.25c). Gemessen wurden Mikrohärtewerte zwischen $507 \pm 115 HV_{0,1}$ bei 5 mm und $556 \pm 75 HV_{0,1}$ bei 9 mm Bahnabstand. Die variierenden Messergebnisse bei verschiedenen Bahnabständen können auf das inhomogene, mehrphasige Schichtgefüge zurückgeführt werden. Durch den sehr geringen Eindruck des Indenters bei der Mikrohärtigkeitmessung, wird in einer Messprozedur die Härte einer einzelnen Phase ermittelt und dementsprechend tritt eine starke Streuung der Messwerte auf. Dies wird auch anhand der recht hohen Standardabweichungen der einzelnen Mikrohärtigkeitwerte deutlich. Dagegen fällt die Kleinlasthärtigkeit der Schichten mit zunehmendem Bahnabstand stetig von $461 \pm 83 HV_{0,5}$ bei 3 mm auf $299 \pm 26 HV_{0,1}$ bei 11 mm ab (Abbildung 6.25d).

Die Rauheit der WSC-Fe Schichten wird nur geringfügig durch den Bahnabstand beeinflusst (Abbildung 6.25e). Bei 3 mm Bahnabstand weisen die Schichten eine Rauheit

R_z von $55,81 \pm 2,57 \mu\text{m}$ auf. Oberhalb von 3 mm wird ein geringfügiges Absinken der Rauheit auf $50,54 \pm 4,81 \mu\text{m}$ bei 9 mm beobachtet. Oberhalb von 9 mm steigt die Rauheit dagegen wieder auf $55,11 \pm 5,56 \mu\text{m}$ bei 11 mm an.

Die Welligkeit der WSC-Fe Schichten in Abhängigkeit des Bahnabstandes ist in Abbildung 6.26 dargestellt. Die geringste Schichtwelligkeit stellt sich bei Bahnabständen zwischen 5 mm und 7 mm ein. Unterhalb von 5 mm zeigt sich dagegen ein leichter Anstieg der Welligkeit, der parallel zu dem erhöhten Rauheitsprofil auftritt. Oberhalb von 7 mm verstärkt sich die Schichtwelligkeit deutlich. Ab hier vergrößert sich sowohl die Amplitude als auch die Periode des Welligkeitsprofils mit zunehmendem Bahnabstand.

Die lichtmikroskopischen Querschliffe der WSC-Fe Schichten zeigen ein lamellares Schichtgefüge, das zum größten Teil aus teilgeschmolzenen und vollständig geschmolzenen Spritzpartikeln aufgebaut ist und einen geringen Anteil an ungeschmolzenen Partikeln beinhaltet (Abbildung 6.27). Die Schichten sind bei allen Bahnabständen dicht und weisen nur eine geringe Anzahl an Mikro- ($\varnothing < 10 \mu\text{m}$) und Makroporen ($\varnothing < 30 \mu\text{m}$) auf. Mit zunehmendem Bahnabstand kann keine deutliche Änderung der Mikrostruktur beobachtet werden. Lediglich die Anzahl an Makroporen im Gefüge nimmt geringfügig zu.

6.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Durch eine Änderung des Bahnabstandes werden verschiedene Eigenschaften der thermischen Spritzschichten beeinflusst. Besonders die für die Bahnplanung wichtige Größe, die Auftragsrate, zeigt eine klare Abhängigkeit von dem Bahnabstand. Bei beiden Schichtsystemen wurde mit einer sehr hohen Bestimmtheit ein hyperbolischer Abfall der Auftragsrate bei einer Vergrößerung des Bahnabstandes beobachtet. Damit kann die resultierende Schichtdicke in einem Beschichtungsvorgang in weiten Bereichen über eine Abänderung des Bahnabstandes eingestellt werden. In der Fachliteratur lassen sich hierzu keine vergleichbaren Ergebnisse finden. In den meisten Veröffentlichungen wird der Bahnabstand konstant gehalten und andere Größen des Beschichtungsprozesses werden untersucht. Lediglich Trifa et al. haben den Einfluss des Bahnabstandes auf die Schichtdicke studiert [TMC07]. Sie beobachteten einen linearen Anstieg der Schichtdicke an atmosphärisch plasmagespritzten $\text{Al}_2\text{O}_3 - 13(\text{TiO}_2)$ Schichten bei einer Vergrößerung des Bahnabstandes. Allerdings wurde als Grundlage für das Modell, die Schichtdicke nur bei zwei unterschiedlichen Bahnabständen gemessen.

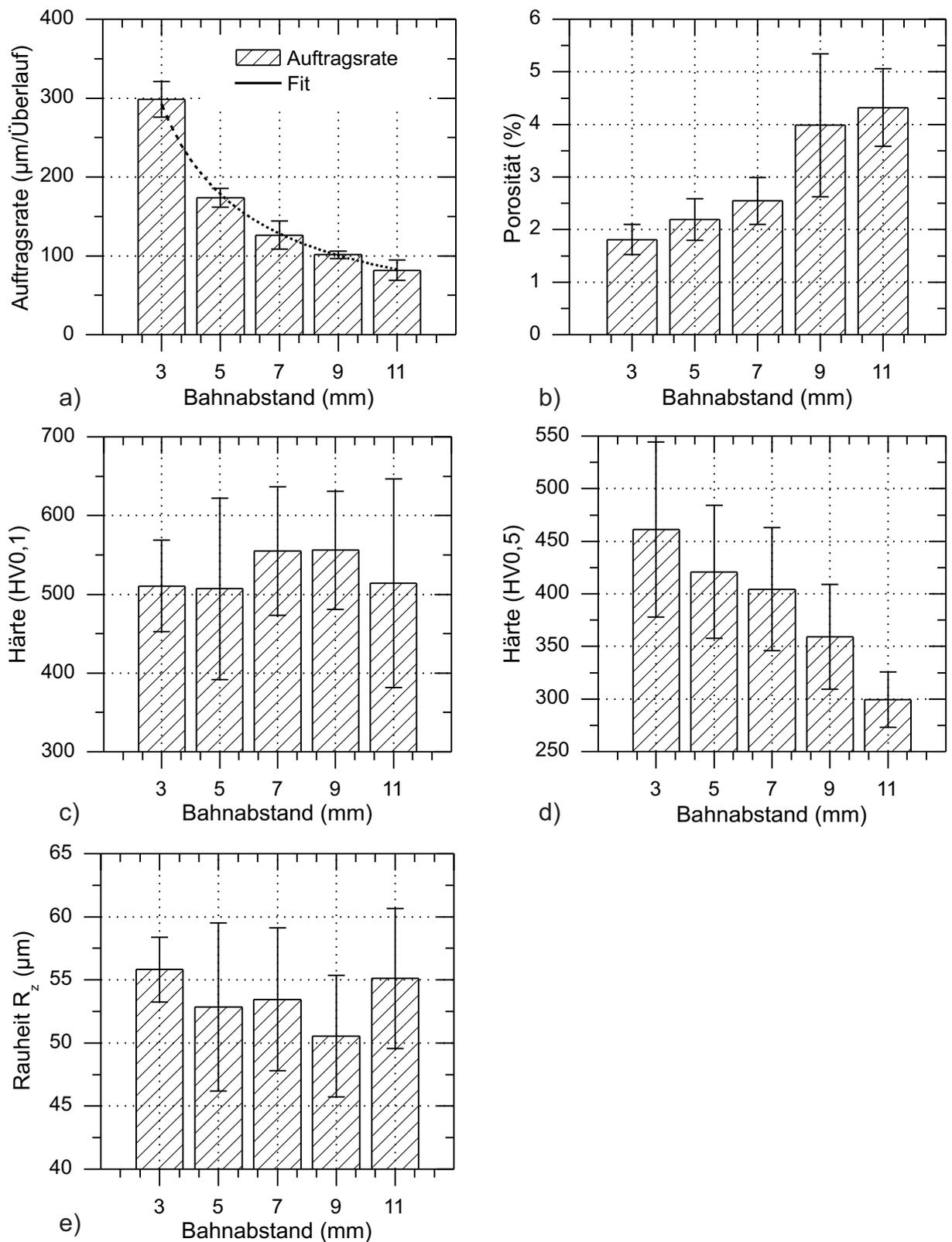


Abbildung 6.25: Einfluss des Bahnabstandes auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_z von lichtbogengespitzten WSC-Fe Schichten

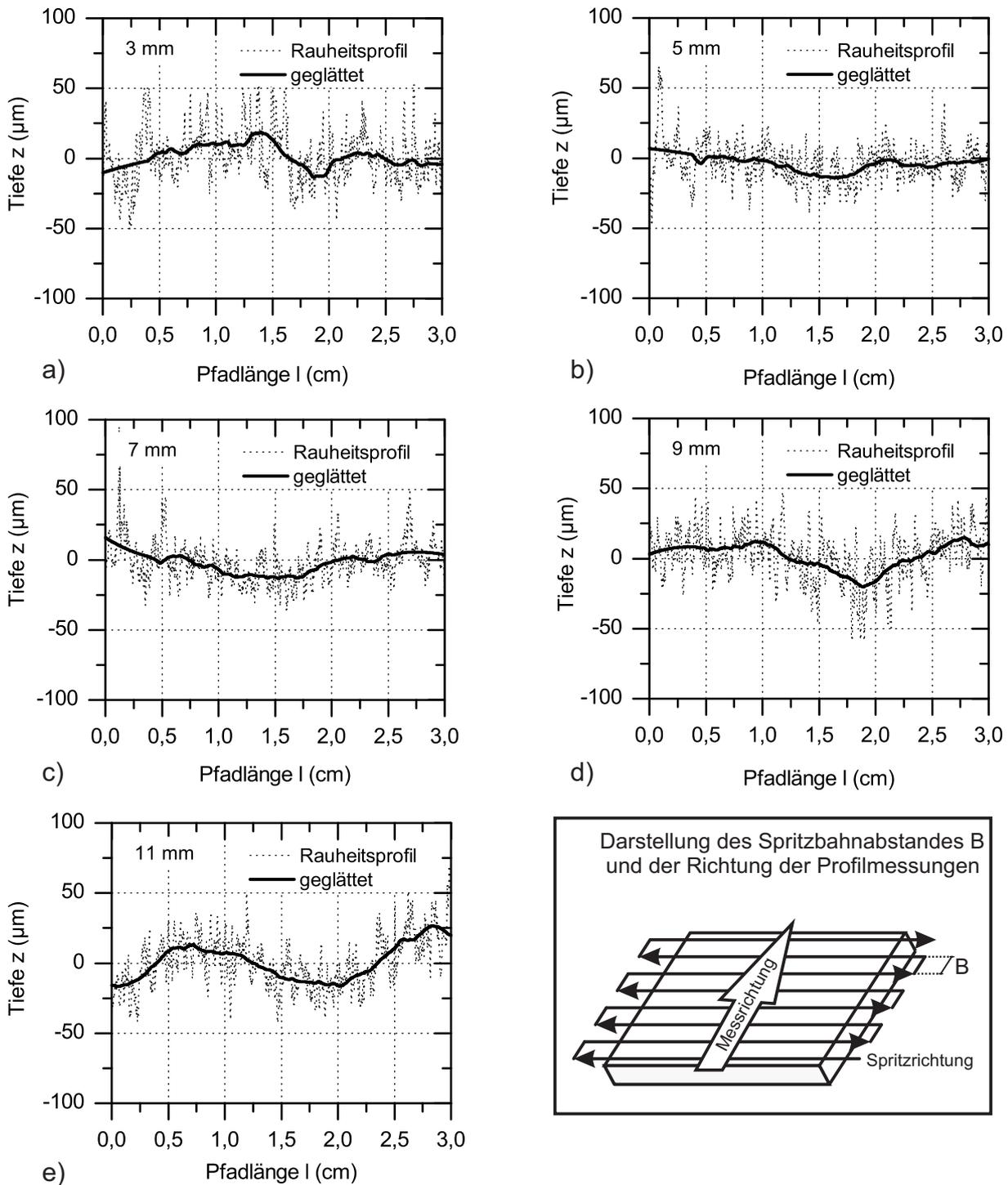


Abbildung 6.26: Darstellung des Oberflächenprofils von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten, Bahnabstand $B = a) 3 \text{ mm}, b) 5 \text{ mm}, c) 7 \text{ mm}, d) 9 \text{ mm}, e) 11 \text{ mm}$

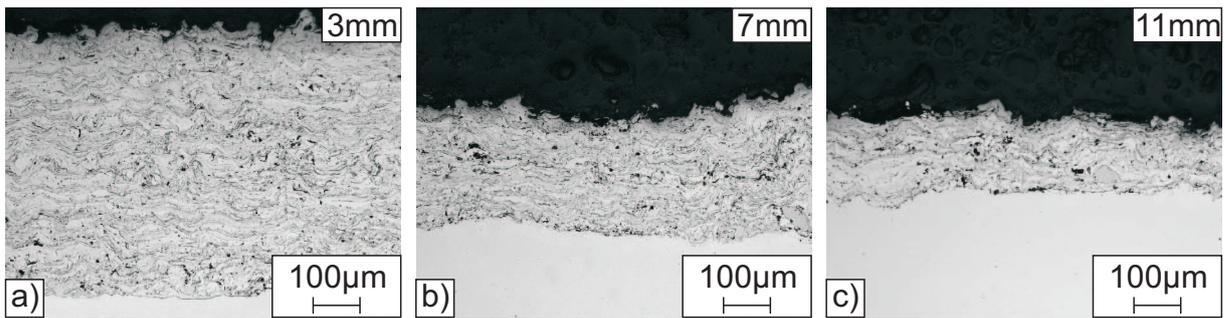


Abbildung 6.27: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei einem Bahnabstand von a) 3mm, b) 7mm und c) 11mm

Der hyperbolische Verlauf der Auftragsrate bei einer Veränderung des Bahnabstandes lässt sich bei einer genauen Betrachtung der geometrischen Zusammenhänge im Spritzprozess verstehen. Eine Thermische Spritzschicht entspricht der Akkumulation vieler Einzelbahnen im Abstand des Bahnabstandes. Die theoretische Auftragsrate kann daher einfach berechnet werden, wenn das Spritzprofil einer einzelnen Spritzbahn gemessen wird und für eine gegebene Breite des Substrates, mit dem jeweiligen Bahnabstand, aufsummiert wird. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 6.28a exemplarischen für das Schichtsystem WSC-Fe und einen Bahnabstand von 5 mm dargestellt. Als Eingangsdaten zur Berechnung der theoretischen Auftragsrate wurden hierbei die gemessenen Spritzprofile aus Kapitel 6.1 bei einem Spritzwinkel von 90° verwendet. Die theoretische Auftragsrate ergibt sich daraus über eine Mittelung der Höhen z im zentralen und relativ konstanten Bereich.

In Abbildung 6.28b sind die theoretische und die experimentelle Auftragsrate bei verschiedenen Bahnabständen für das Schichtsystem WSC-Fe dargestellt. Deutlich lässt sich erkennen, dass beide Auftragsraten eine vergleichbare Korrelation mit dem Bahnabstand aufweisen. Die theoretische Kurve weist allerdings bei allen Bahnabständen eine höhere Auftragsrate als die experimentelle Kurve auf. Für einen besseren Vergleich der Werte wurde daher der prozentuale Verlauf der theoretischen und der experimentellen Auftragsrate, sowie die Abweichung zwischen den beiden Kurven ermittelt. Dieses ist in Abbildung 6.28c für das Schichtsystem WSC-Fe und in Abbildung 6.28d für das Schichtsystem WC-12Co dargestellt. Die theoretische und die experimentelle prozentuale Auftragsrate weisen denselben Verlauf auf. Es zeigen sich nur minimale Unterschiede zwischen den Kurven, die auf Messungenauigkeiten zurückzuführen sind. Der Anstieg der Auftragsrate bei einer Verringerung des Bahnabstandes ist daher ausschließlich auf die unterschiedliche geometrische Überlagerung der Spritzprofile zurückzuführen. Werkstoffwissenschaftliche Aspekte können hierbei vernachlässigt werden.

Die Abbildungen verdeutlichen allerdings auch, dass zwischen der theoretischen und der experimentellen Auftragsrate hohe Abweichungen auftreten, die für das Schichtsystem WSC-Fe bis zu 20,22 % und für das Schichtsystem WC-12Co bis zu 54,27 % ausmachen. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls von Trifa et al. beobachtet [TMC05a]. Sie begründen die Abweichungen damit, dass bei der theoretischen Aufsummierung der einzelnen Spritzprofile Einflüsse wie die Schichtrauheit und Partikelzerspritzungen nicht berücksichtigt werden und daher eine zu hohe Schichtdicke vorgetäuscht wird. Diese Erkenntnis ist besonders für die Bahnplanung mit einzelnen Spritzprofilen von großer Bedeutung, da andernfalls falsche Schichtdicken berechnet werden.

Die Mikrostruktur der Spritzschichten wird dagegen nur geringfügig durch den Bahnabstand beeinflusst. Ausschließlich eine marginale Veränderung der Schichtporosität wird in den Messungen beobachtet. Besonders bei dem Schichtsystem WSC-Fe steigt oberhalb von 7 mm die Porosität um knapp 1,5 % an. Zusätzlich zeigt sich eine leichte Tendenz, dass vermehrt Makroporen bei höheren Bahnabständen auftreten. Verursacht wird dies bei verschiedenen Bahnabständen durch den unterschiedlichen Wärmeeintrag des Spritzbrenners in die Beschichtung. Eine Verringerung des Bahnabstandes bewirkt dabei, dass sich die Beschichtung lokal stärker erwärmt und daher vermehrt Diffusionsvorgänge stattfinden, wodurch auf die Substratoberfläche auftreffende Spritzpartikel stärker abflachen und eine geringere Anzahl an Poren entsteht. Dieses Phänomen wird in der Fachliteratur mehrfach beschrieben [JMS99, SJM⁺99, PLCM03, Flo09].

Die unterschiedliche Aufheizung der Beschichtung bei verschiedenen Bahnabständen hat keinen meßbaren Einfluss auf die Phasenzusammensetzung der Beschichtung. Bei beiden Schichtsystemen zeigen sich keine deutlichen Änderungen der Mikrohärtigkeit, die typischerweise mit thermischen Zersetzungen des Schichtgefüges oder der Bildung neuer Phasen einhergeht. Die Kleinlasthärtigkeit der Schichtsysteme fällt dagegen bei einer Vergrößerung des Bahnabstandes signifikant ab. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass bei kleinen Bahnabständen stärkere thermische Verspannungen des Kristallgitters auftreten und dadurch eine Aufhärtung der Beschichtung stattfindet. Bei dem Schichtsystem WSC-Fe wird das Absinken der Kleinlasthärtigkeit zusätzlich durch die höhere Porosität der Spritzschichten bei größeren Verfahrensgeschwindigkeiten begünstigt.

Einen weiteren wesentlichen Einfluß des Bahnabstandes konnte anhand der resultierenden Schichttopographie beobachtet werden. Besonders oberhalb von 9 mm zeigt sich ein deutlicher Anstieg der Schichtwelligkeit bei beiden Schichtsystemen, durch die die Konturgenauigkeit der Beschichtungen verloren geht. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche. In der Fachliteratur wird der

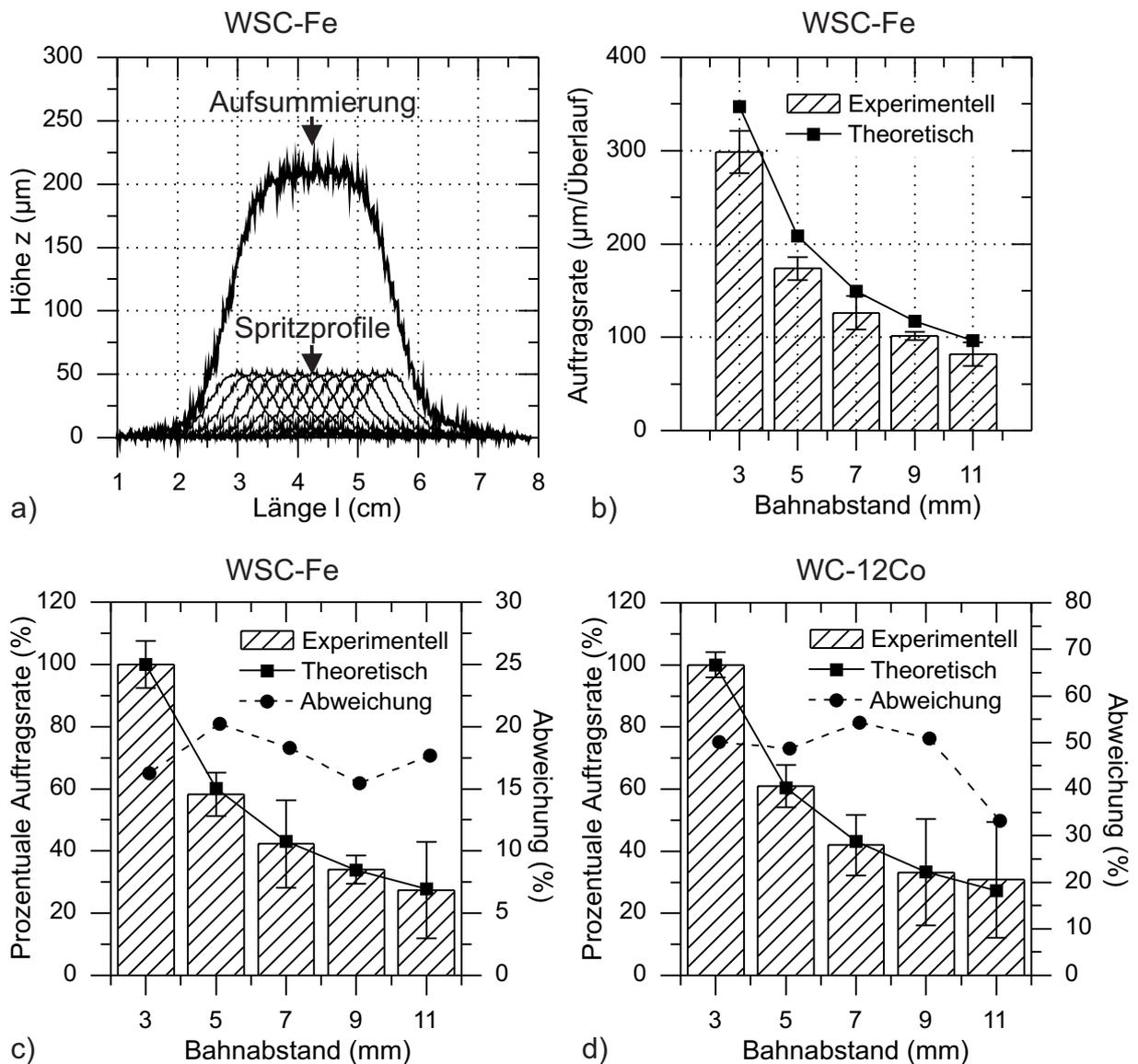


Abbildung 6.28: a) Aufsummierung der gemessenen WSC-Fe Spritzprofile zur Ermittlung der theoretischen Schichtdicke ($B = 5 \text{ mm}$), b) Gegenüberstellung der theoretischen und der experimentell ermittelten Auftragsrate als Funktion des Bahnabstandes für WSC-Fe, Darstellung der theoretischen prozentualen Auftragsrate, der experimentell ermittelten prozentualen Auftragsrate und der prozentualen Abweichung zwischen den theoretischen und den experimentellen Werten als Funktion des Bahnabstandes für c) WSC-Fe und d) WC-12Co

Einsatz eines Bahnabstandes in der Größenordnung einer Standardabweichung σ des Spritzprofils empfohlen [FWP92, WPA92]. Diese beträgt für das Schichtsystem WC-12Co $\sigma = 0,62 \text{ mm}$ und für das Schichtsystem WSC-Fe $\sigma = 0,76 \text{ mm}$. Bei Bahnabständen unterhalb der Standardabweichung bilden sich konform zu den Ergebnissen der Fachliteratur glatte Schichten, während oberhalb der Standardabweichung die Schichtwelligkeit deutlich ansteigt. Dieser Zusammenhang wurde ebenfalls von Trifa et al. beobachtet [TMC07]. Die Ursache dafür ist die unterschiedliche geometrische Überlagerung der Spritzprofile bei verschiedenen Bahnabständen. Die Änderung des Welligkeitsprofils hat allerdings keinen Einfluss auf die Schichttraueheit. Diese bleibt konstant bei allen Bahnabständen. Es werden nur geringfügige Streuungen der Rauigkeit beobachtet, die auf die teilweise inhomogene Schichtoberfläche und Ungenauigkeiten in den Messungen zurückzuführen sind.

6.4 Verfahrensgeschwindigkeit

Die Verfahrensgeschwindigkeit ist eine wichtige Größe für die Bahnplanung bei der Beschichtung komplexer Bauteile. Sie kann bei einer gegebenen Spritzbahn abgeändert werden, ohne dass eine neue Bahnplanung vorgenommen werden muss. Besonders bei der Beschichtung von Bauteilen mit einer hohen Geometriekomplexität, erreicht der Beschichtungsroboter häufig nicht auf der gesamten Bauteiloberfläche eine gleichmäßige Verfahrensgeschwindigkeit, so dass Schwankungen der Schichtdicke die Folge sind. Eine gleichmäßige Schichtdicke und -qualität kann daher nur durch eine genaue Kenntnis des Einflusses der Verfahrensgeschwindigkeit auf die Schichteigenschaften erzielt werden. Im Folgenden werden Untersuchungen der Verfahrensgeschwindigkeit für das atmosphärisch plasmagespritzte Schichtsystem WC-12Co und das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe vorgestellt und im Anschluß diskutiert.

6.4.1 Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co

Die Verfahrensgeschwindigkeit beeinflusst hauptsächlich die Auftragsrate des atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichtsystems. Diese sinkt mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit zunächst deutlich von $37,21 \pm 0,85 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 167 mm/s auf $11,99 \pm 0,14 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 583 mm/s ab. Oberhalb von 583 mm/s tritt nur ein geringfügiger Abfall der Auftragsrate auf. Der Minimalwert wird mit $8,66 \pm 1,25 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 833 mm/s gemessen (Abbildung 6.29a). Der experimentelle Verlauf der Auftragsrate kann durch eine Hyperbel beschrieben werden:

$$A_{WC-12Co}(V) = 3971,30 \cdot V^{-0,91} \quad (6.11)$$

Hierbei ist $A_{WC-12Co}$ [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$] die Auftragsrate und V [mm/s] die Verfahrensgeschwindigkeit. Die gemessenen Werte korrelieren sehr gut mit der theoretischen Anpassung. Es wurde ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,98$ ermittelt.

Die Porosität der Spritzschichten steigt zwischen 167 mm/s und 333 mm/s steil von $4,35 \pm 0,93\%$ auf $7,42 \pm 0,64\%$ an (Abbildung 6.29b). Oberhalb von 333 mm/s vermindert sich die Porosität tendenziell bis zu $4,56 \pm 0,75\%$ bei 833 mm/s. Nur bei 667 mm/s tritt ein Ausreißer aus dem allgemeinen Trend auf.

Die Spritzschichten weisen zwischen den Verfahrensgeschwindigkeiten 167 mm/s und 333 mm/s hohe Mikrohärtungen auf, die im Mittel bei $1313 \pm 254 HV_{0,1}$ liegen (Abbildung 6.29c). Oberhalb von 333 mm/s bilden sich Spritzschichten mit geringeren Mikrohärtewerten, die zwischen $947 \pm 200 HV_{0,1}$ bei 833 mm/s und $1247 \pm 223 HV_{0,1}$ bei 750 mm/s streuen. Die Kleinlasthärte der WC-12Co Spritzschichten steigt zwischen 167 mm/s und 250 mm/s zunächst von $861 \pm 89 HV_{0,5}$ auf $994 \pm 203 HV_{0,5}$ an (Abbildung 6.29d). Oberhalb von 250 mm/s zeigt sich ein Abfall der Kleinlasthärte bis hin zu $743,05 \pm 139 HV_{0,5}$ bei 833 mm/s. Nur bei 333 mm/s wurde eine dem allgemeinen Verlauf nach zu geringe Kleinlasthärte gemessen.

Die Rauheit der WC-12Co Schichten ist über den gesamten Messbereich konstant (Abbildung 6.29e). Geringfügige Variationen der Rauheit zwischen $25,78 \pm 1,67 \mu\text{m}$ bei 250 mm/s und $29,71 \pm 4,73 \mu\text{m}$ bei 333 mm/s resultieren aus der teilweise inhomogenen Schichtoberfläche.

Lichtmikroskopische Aufnahmen an Querschliffen der WC-12Co Schichten zeigen bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von 167 mm/s ein stark umgeschmolzenes Gefüge mit einer großen Anzahl an Mikroporen ($\varnothing < 5 \mu\text{m}$) sowie einigen wenigen Makroporen ($\varnothing < 30 \mu\text{m}$). Bei einer Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit bis 333 mm/s nimmt die Anzahl an Mikroporen deutlich ab, parallel dazu steigt jedoch die Anzahl an Makroporen an. Oberhalb von 333 mm/s kann keine deutliche Veränderung der Porenverteilung beobachtet werden. Allerdings zeigt sich eine Tendenz, dass besonders bis 333 mm/s der Anteil an stark umgeschmolzenen Phasen abnimmt. In Abbildung 6.30 sind repräsentative Querschliffe bei den Verfahrensgeschwindigkeiten 167 mm/s, 500 mm/s und 750 mm/s dargestellt.

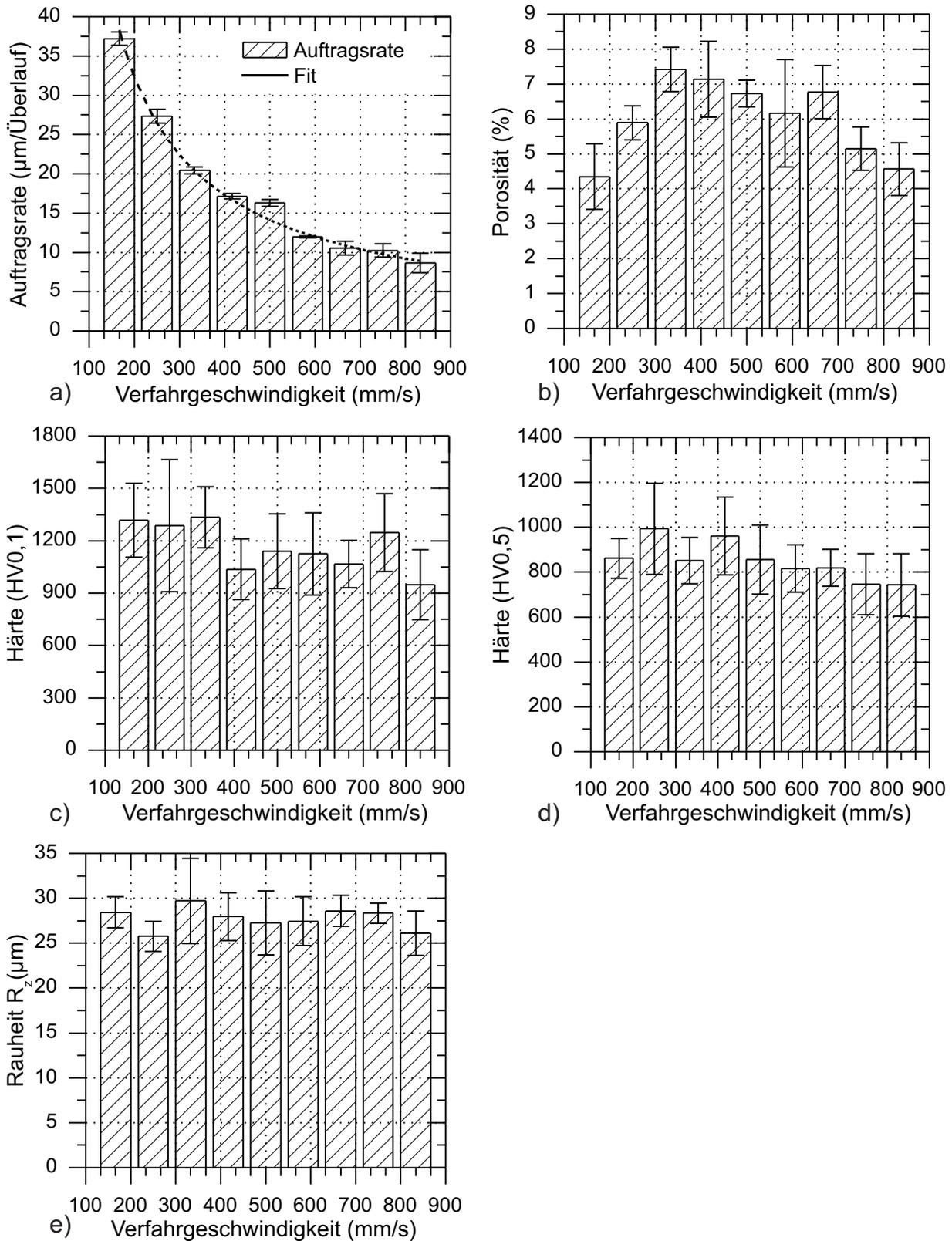


Abbildung 6.29: Einfluss der Verfahrensgeschwindigkeit auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_z von atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co Schichten

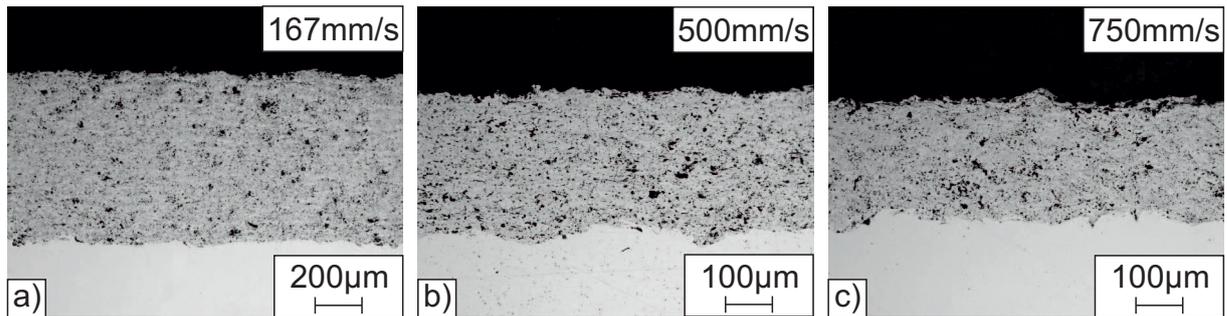


Abbildung 6.30: Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmaspritzten WC-12Co Schichten bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von a) 167mm/s, b) 500mm/s und c) 750mm/s

6.4.2 Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe

Die Auftragsrate der WSC-Fe Schichten sinkt mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit deutlich von $814,33 \pm 24,60 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 50 mm/s auf $193,45 \pm 17,18 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 200 mm/s ab (Abbildung 6.31a). Oberhalb von 200 mm/s wird lediglich ein geringfügiger Abfall der Auftragsrate auf $110,54 \pm 16,11 \mu\text{m}/\text{Überlauf}$ bei 350 mm/s beobachtet. Der experimentelle Verlauf der Auftragsrate kann in sehr guter Näherung durch eine Hyperbel beschrieben werden:

$$A_{WSC-Fe}(V) = 45136,79 \cdot V^{-1,02} \quad (6.12)$$

Hierbei ist A_{WSC-Fe} [$\mu\text{m}/\text{Überlauf}$] die Auftragsrate und V [mm/s] die Verfahrensgeschwindigkeit. Das Bestimmtheitsmaß der Anpassung beträgt $R^2 = 1,00$. Die theoretische Beschreibung der Auftragsrate ist damit als sehr gut zu bewerten.

Die Porosität der Spritzschichten steigt zwischen 50 mm/s und 100 mm/s deutlich von $3,02 \pm 1,02 \%$ auf $5,30 \pm 0,79 \%$ an (Abbildung 6.31b). Ab 100 mm/s kann keine signifikante Änderung der Porosität beobachtet werden. Geringfügige Streuungen der Porosität resultieren aus statistischen Schwankungen der Schichtmorphologie.

Die Mikrohärtigkeit der Spritzschichten sinkt von $819 \pm 307 HV_{0,1}$ bei 50 mm/s auf $551 \pm 159 HV_{0,1}$ bei 150 mm/s ab (Abbildung 6.31d). Oberhalb von 150 mm/s bleibt die Mikrohärtigkeit annähernd konstant. Nur bei 250 mm/s liegt mit einer Mikrohärtigkeit von $766 \pm 362 HV_{0,1}$ einer dem allgemeinen Trend nach zu hoher Wert vor. Die teilweise starken Streuungen der Messwerte sind ein Resultat des inhomogenen Schichtgefüges. Die Kleinlasthärtigkeit der Spritzschichten fällt tendenziell mit einer Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit ab (Abbildung 6.31d). Besonders zwischen 50 mm/s und 100 mm/s

zeigt sich eine signifikante Verminderung der Kleinlasthärte von $511 \pm 129 HV_{0,5}$ auf $450 \pm 106 HV_{0,5}$.

Die Rauheit der WSC-Fe Spritzschichten verringert sich geringfügig bei einer Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit (Abbildung 6.31e). Zwischen 50 mm/s und 150 mm/s wird im Mittel eine Rauheit von $53,67 \pm 5,85 \mu m$ gemessen. Bei höheren Verfahrensgeschwindigkeiten sinkt dagegen die Rauheit ab. Im Mittel beträgt sie hier $46,79 \pm 3,43 \mu m$.

Die lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten weisen ein stark lamellares Schichtgefüge mit ungeschmolzenen, teilgeschmolzenen und komplett umgeschmolzenen Phasen auf. Bei allen Verfahrensgeschwindigkeiten zeigen sich statistisch verteilte Mikro ($\varnothing < 10 \mu m$) und Makroporen ($\varnothing < 30 \mu m$) in der Beschichtung sowie einige horizontale Risse zwischen den Schichtlamellen. Mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit nimmt tendenziell der Anteil an stark umgeschmolzenen Phasen ab und es werden vermehrt teilgeschmolzene Karbide beobachtet. Parallel dazu treten verstärkt horizontale Risse im Schichtgefüge auf. In Abbildung 6.32 sind repräsentative lichtmikroskopische Aufnahmen von WSC-Fe Querschliffen bei den Verfahrensgeschwindigkeiten 100 mm/s, 200 mm/s und 350 mm/s dargestellt.

6.4.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Verfahrensgeschwindigkeit kann bei dem atmosphärisch plasmagespritzten WC-12Co und dem lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichtsystem in weiten Bereichen frei eingestellt werden, ohne dass signifikante Änderungen der Schichtmorphologie und -topographie auftreten. Dagegen verändert sich die Auftragsrate in einem Beschichtungsvorgang deutlich mit zunehmender Verfahrensgeschwindigkeit. Unter der Annahme, dass bei unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten die gleiche Anzahl an Spritzteilchen pro Zeiteinheit auf das Substrat treffen und eine Schicht bilden, hat eine Verdoppelung der Verfahrensgeschwindigkeit eine Halbierung der Auftragsrate zur Folge. Mathematisch wird dieser Zusammenhang durch die hyperbolische Funktion $f(x) = c \cdot x^{-1}$ beschrieben.

Ein derart hyperbolischer Verlauf der Auftragsrate wurde bei beiden Schichtsystemen beobachtet. Die empirisch ermittelte Hyperbel für das Schichtsystem WSC-Fe hat einen Exponenten von -1,02 und stimmt somit fast exakt mit der Theorie überein. Das Absinken der Auftragsrate bei einer Erhöhung der Verfahrensgeschwindigkeit kann daher ausschließlich auf die geometrischen Bedingungen im Spritzprozess zurückgeführt werden. Diese führen bei einer höheren Verfahrensgeschwindigkeit dazu, dass weniger

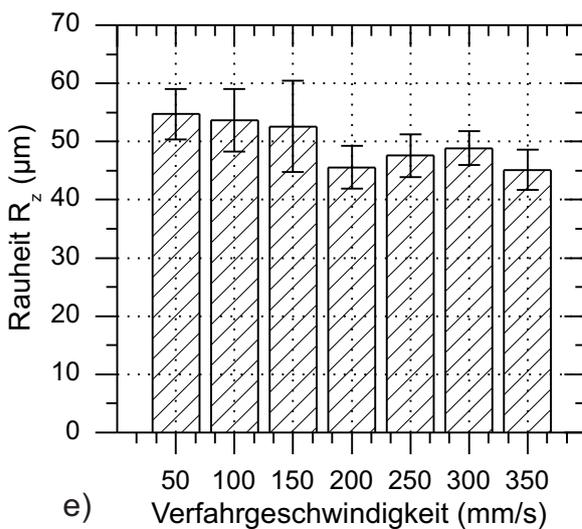
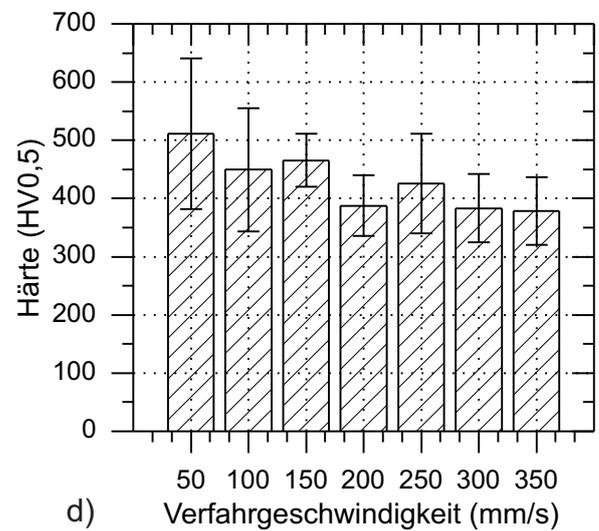
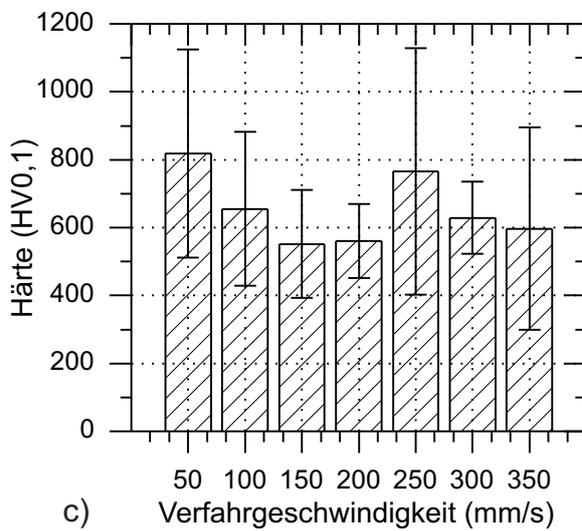
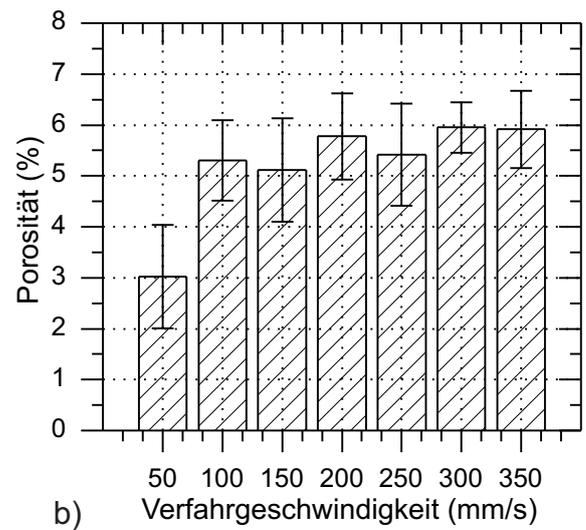
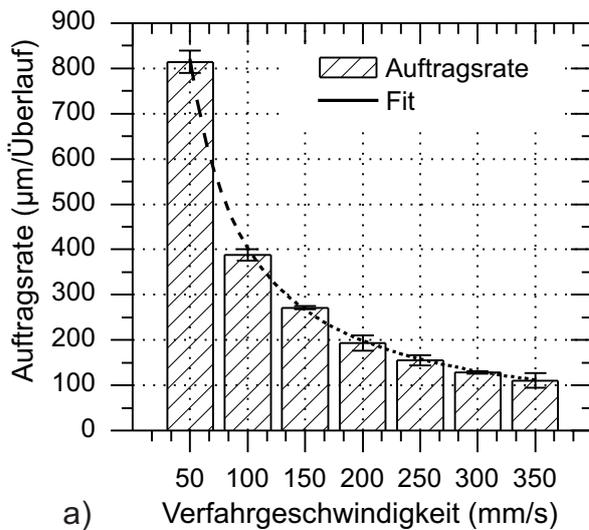


Abbildung 6.31: Einfluss der Verfahrensgeschwindigkeit auf a) die Auftragsrate, b) die Porosität, c) die Mikrohärtigkeit, d) die Kleinlasthärtigkeit und e) die Rauheit R_z von lichtbogen-gespritzten WSC-Fe Schichten

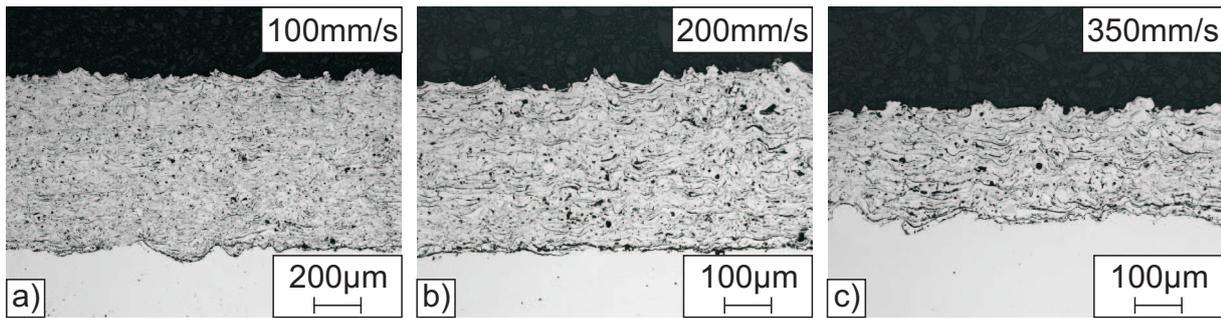


Abbildung 6.32: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten WSC-Fe Schichten bei einer Verfahrensgeschwindigkeit von a) 100mm/s, b) 200mm/s und c) 350mm/s

Spritzteilchen pro Zeiteinheit auf dieselbe Stelle des Substrates auftreffen. Das Schichtsystem WC-12Co zeigt hingegen eine geringfügige Abweichung von der Theorie. Die empirisch ermittelte hyperbolische Funktion der Auftragsrate hat einen Exponenten von -0,91, als dessen Folge ein langsames Absinken der Auftragsrate als in der Theorie auftritt. Daraus kann geschlossen werden, dass die Auftragsrate nicht alleine durch die Geometrie im Spritzprozess beeinflusst wird, sondern auch werkstoffwissenschaftliche Aspekte zur Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Der höhere Wärmeeintrag in das Substrat bei geringeren Verfahrensgeschwindigkeit könnte beispielsweise einen Einfluss auf die Auftragsrate haben. In der Fachliteratur wird mehrfach beschrieben, dass eine Verringerung der Verfahrensgeschwindigkeit einen Anstieg der Substrattemperatur zur Folge hat [CG09b, GDRJ06, BBR04, BIC02, WIL10, FH02]. Trifa et al. ermittelten darüberhinaus, dass bei dem Plasmaspritzen von $Al_2O_3 - 13(TiO_2)$, eine höhere Substrattemperatur bei geringen Verfahrensgeschwindigkeiten, einen überproportionalen Anstieg der Auftragsrate zur Folge hat. Dies kann für die hier untersuchten Schichtsysteme allerdings nicht bestätigt werden.

Es lassen sich jedoch auch deutliche Anhaltspunkt an den hier verwendeten Schichtsystemen finden, dass bei geringeren Verfahrensgeschwindigkeiten die Substrattemperatur signifikant ansteigt. Bei sehr geringen Verfahrensgeschwindigkeiten tritt ein Abfall der Porosität und ein Anstieg der Schichthärte auf. Höchstwahrscheinlich führt eine höhere Substrattemperatur dazu, dass auf die Substratoberfläche auftreffende Spritzpartikel in einer größeren Zeitspanne erstarren und sich dadurch flachere und breitere Splats ausbilden. Parallel dazu laufen vermehrt Diffusionsvorgänge ab, wodurch in der Summe dichtere Schichten mit einer höheren Kohäsion entstehen [JWHS01, SJ01, PLCM03]. Die höhere Substrattemperatur geht allerdings mit einer thermischen Zersetzung des Spritzzusatzes einher, die eine Ausbildung von harten und spröden Phasen bewirkt.

Werden hingegen sehr hohe Verfahrensgeschwindigkeiten verwendet, so verringert sich

der thermische Energieeintrag in die Substratoberfläche, wodurch diese übermäßig abkühlt. Auf die Substratoberfläche auftreffende Spritzteilchen erstarren dadurch in einer zu geringen Zeitspanne und bilden Schichten mit einer geringen Kohäsion. Bei dem Schichtsystem WC-12Co hat das zur Folge, dass vermehrt Makroporen im Schichtgefüge auftreten, während bei dem Schichtsystem WSC-Fe die Anzahl an horizontalen, interlamellaren Rissen im Schichtgefüge ansteigt.

6.5 Kombination von Bahnplanungsparametern

Bei der Beschichtung komplexer Bauteile ist es häufig unvermeidbar, dass beim Überfahren der Bauteiloberfläche ein oder mehrere Bahnplanungsparameter von ihrem Idealwert abweichen. Werden beispielsweise Bauteile beschichtet, die drastische Änderungen der Bauteilkontur aufweisen, so begrenzt das dynamische Verhalten des Beschichtungsroboters die maximale Geschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche [AT97]. Das kann zur Folge haben, dass die effektive Verfahrgeschwindigkeit der Spritzpistole unterhalb des gewünschten Wertes liegt. Bei verschiedenen Bauteilgeometrien ist es darüberhinaus unumgänglich, dass der Spritzwinkel von der idealen rechtwinkligen Geometrie abweicht. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Beschichtung von Innenzylindern [KNR98]. Beim Eintritt der Spritzpistole in den Innenzylinder muss der Spritzwinkel schrittweise verringert werden, um ein Anstoßen der Spritzpistole gegen die Außenwand des Zylinders zu verhindern. Darüberhinaus gibt es zahllose denkbare Beispiele, bei denen eine Änderung eines Bahnplanungsparameters geometriebedingt durchgeführt werden muss.

Eine zwingende Veränderung eines Bahnplanungsparameters bewirkt, dass die Dicke der Beschichtung von dem gewünschten Wert abweicht und Änderungen in der Schichtqualität auftreten. Die Veränderungen der Schichtqualität wurden in den vorhergehenden Abschnitten diskutiert. Die Veränderung der Schichtdicke bei der Abweichung eines Parameters vom Sollwert kann durch die Variation eines zweiten Bahnplanungsparameters kompensiert werden. Eine zu geringe Verfahrgeschwindigkeit kann beispielsweise durch einen höheren Bahnabstand ausgeglichen werden, ein zu geringer Spritzwinkel kann durch eine höhere Verfahrgeschwindigkeit aufgehoben werden. Dadurch ergeben sich zahlreiche Kombinationsmöglichkeiten, um eine unerwünschte Änderung der Schichtdicke zu vermeiden. In der Fachliteratur lassen sich jedoch keine Veröffentlichungen finden, in denen eine Kombination von Bahnplanungsparametern systematisch durchgeführt wurde.

In den vorhergehenden Abschnitten wurden verschiedene mathematische Modelle für den Spritzwinkel, den Spritzabstand, den Bahnabstand und die Verfahrgeschwindigkeit empirisch ermittelt. Mit diesen Modellen kann die Auftragsrate bei einem bestimmten Wert dieser vier Parameter vorhergesagt werden. Es gilt allerdings noch zu überprüfen, inwiefern diese Modelle zur Prognose der Schichtdicke miteinander kombiniert werden können. Dazu werden im Folgenden experimentelle Versuchsreihen vorgestellt, in denen jeweils zwei oder drei Bahnplanungsparameter miteinander kombiniert wurden und im Anschluß die Schichtdicke der Beschichtung mit dem im Modell prognostizierten Wert verglichen wurde. Die resultierenden Schichtdicken der Thermischen Spritzschichten wurden dabei durch eine Addition der einzelnen empirischen Modelle ermittelt. Das Modell für den Spritzabstand wurde hierbei vernachlässigt, da es eine zu geringe Korrelation mit den Messdaten aufweist.

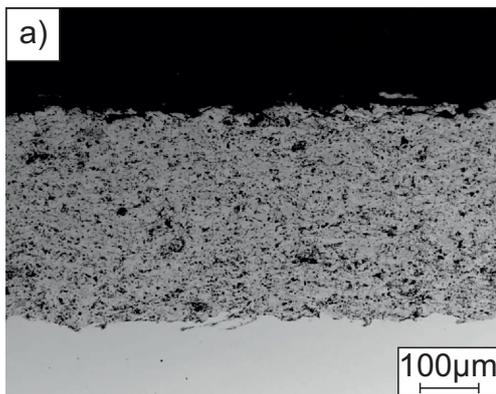
6.5.1 Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co

Die Ergebnisse der Kombinationen von Bahnplanungsparametern für das Schichtsystem WC-12Co sind in Abbildung 6.33 dargestellt. In Abbildung 6.33a wurde die Verfahrgeschwindigkeit mit dem Spritzwinkel, in Abbildung 6.33b die Verfahrgeschwindigkeit mit dem Bahnabstand und in Abbildung 6.33c der Bahnabstand mit dem Spritzwinkel kombiniert. Der dritte Bahnplanungsparameter wurde dabei am Optimalwert konstant gehalten. In Abbildung 6.33d wurden dagegen alle drei Parameter gleichzeitig variiert.

Bei allen untersuchten Kombinationen der Bahnplanungsparameter konnte die Schichtdicke gut durch eine Verknüpfung der empirischen Modelle prognostiziert werden. In allen Fällen treten Abweichung unterhalb von 6 % auf. Die Mikrostruktur der Schichten entspricht einer Kombination der ermittelten Effekte der einzelnen Bahnplanungsparameter. So weisen beispielsweise alle Beschichtungen bei denen der Spritzwinkel verringert wurde eine verkippte Lamellenstruktur auf.

6.5.2 Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe

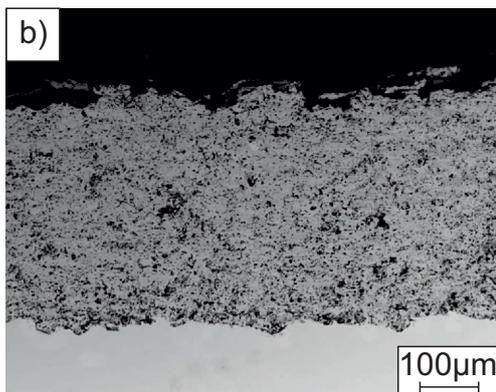
In Abbildung 6.34 sind die Ergebnisse der Kombinationen von Bahnplanungsparametern für das Schichtsystem WSC-Fe dargestellt. Abbildung 6.34a zeigt die Ergebnisse der Variation der Verfahrgeschwindigkeit und des Spritzwinkels, Abbildung 6.34b der Verfahrgeschwindigkeit und des Bahnabstandes, Abbildung 6.34c des Bahnabstan-

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 530 \text{ mm/s}$
- $B = 5 \text{ mm}$
- $\alpha = 80^\circ$

Schichtdicke

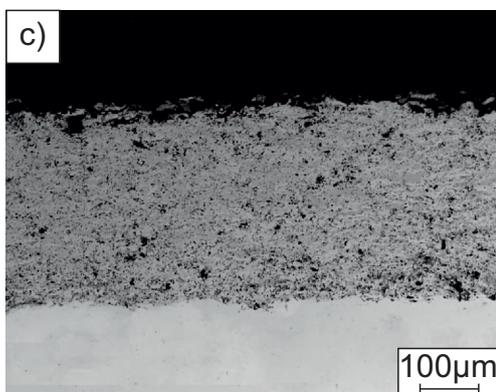
- gemessen: $352 \pm 24 \mu\text{m}$
- prognostiziert: $346 \mu\text{m}$
- Abweichung: 1,7 %

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 350 \text{ mm/s}$
- $B = 6,15 \text{ mm}$
- $\alpha = 90^\circ$

Schichtdicke

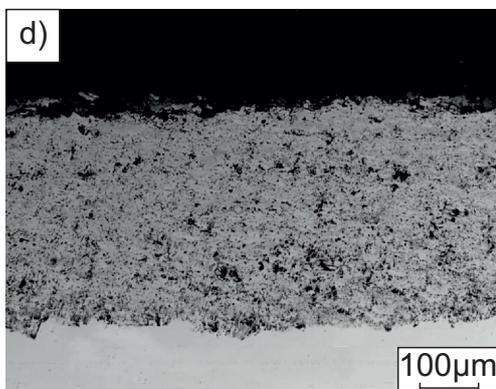
- gemessen: $395 \pm 25 \mu\text{m}$
- prognostiziert: $393 \mu\text{m}$
- Abweichung: 0,5 %

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 500 \text{ mm/s}$
- $B = 5,3 \text{ mm}$
- $\alpha = 80^\circ$

Schichtdicke

- gemessen: $325 \pm 18 \mu\text{m}$
- prognostiziert: $345 \mu\text{m}$
- Abweichung: 5,8 %

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 320 \text{ mm/s}$
- $B = 7 \text{ mm}$
- $\alpha = 66^\circ$

Schichtdicke

- gemessen: $371 \pm 19 \mu\text{m}$
- prognostiziert: $385 \mu\text{m}$
- Abweichung: 3,6 %

Abbildung 6.33: Ergebnisse der Kombination von Bahnplanungsparametern für das Schichtsystem WC-12Co

Messwerte	WC-12Co	WSC-Fe
prognostizierte Schichtdicke [μm]	347	358
Minimum [μm]	293	313
Maximum [μm]	398	439
Mittelwert [μm]	352	366
Standardabweichung [μm]	23	28
prozentuale Standardabweichung [%]	6,4	7,6

Tabelle 6.1: Statistische Streuung der Schichtdicke im atmosphärischen Plasmaspritzprozess mit WC-12Co und im Lichtbogenspritzprozess mit WSC-Fe

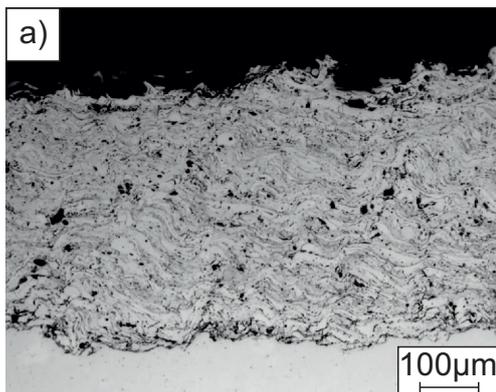
des und des Spritzwinkels und Abbildung 6.34d eine Kombination aller drei Parameter.

Bei dem Schichtsystem WSC-Fe konnte die Schichtdicke ebenfalls gut durch eine Verknüpfung der empirischen Modelle prognostiziert werden. Die Abweichungen liegen bei diesem Schichtsystem unterhalb von 5 %. Genau wie bei dem Schichtsystem WC-12Co spiegeln sich auch hier die geänderten Bahnplanungsparameter in der Mikrostruktur der Beschichtung wieder.

6.5.3 Diskussion der Ergebnisse

Durch eine Verknüpfung der empirischen Modelle konnte für beide Schichtsysteme in guter Näherung die Schichtdicke bei einer Kombination der Bahnplanungsparametern prognostiziert werden. Es wurden nur geringe Abweichungen unterhalb von 6 % gemessen. Dies ist ein wichtiges Ergebnis für die Bahnplanung zur Beschichtung komplexer Oberflächen, da diese Erkenntnis die Kompensation von unvermeidbaren Änderungen eines oder mehrerer Bahnparameter durch die anderen Bahnparameter ermöglicht.

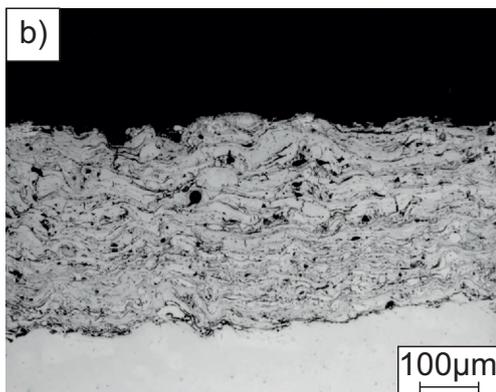
Zur Überprüfung der Güte der Vorhersage bei einer Kombination von Bahnplanungsparametern wurden mehrere Beschichtungen mit den optimierten Spritzparametern hergestellt. Hierdurch sollte die statistische Streuung des Spritzprozesses ermittelt werden. In Tabelle 6.1 sind diese Ergebnisse dargestellt. Die WC-12Co Schichten weisen eine maximale Abweichungen von dem Mittelwert um $59 \mu\text{m}$ auf. Die prozentuale Standardabweichung beträgt 6,4 %. Bei dem Schichtsystem WSC-Fe wurde hingegen eine maximale Abweichung von dem Mittelwert von $73 \mu\text{m}$ gemessen und die prozentuale Standardabweichung beträgt 7,6 %. Die Güte der Schichtdickenvorhersage kann daher als sehr gut bewertet werden, da der Fehler der Vorhersage geringer als die statistische Streuung des Spritzprozesses ist.

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 150$ mm/s
- $B = 5$ mm
- $\alpha = 59^\circ$

Schichtdicke

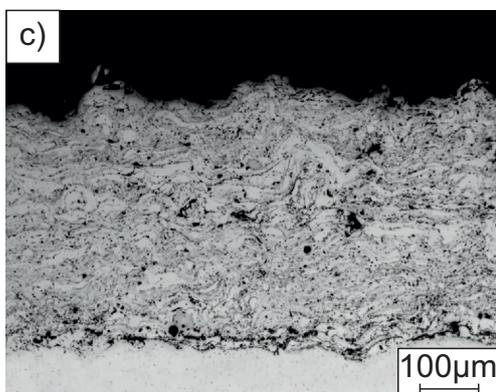
- gemessen: 438 ± 33 μm
- prognostiziert: 455 μm
- Abweichung: 3,7 %

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 268$ mm/s
- $B = 4$ mm
- $\alpha = 90^\circ$

Schichtdicke

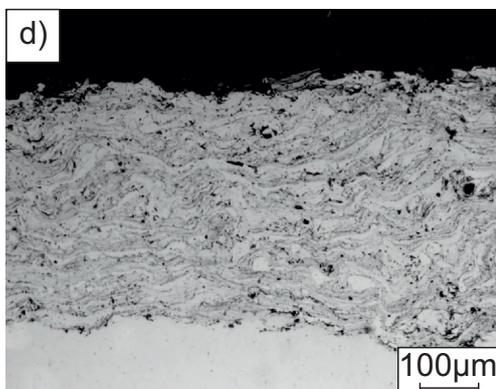
- gemessen: 346 ± 18 μm
- prognostiziert: 330 μm
- Abweichung: 4,9 %

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 200$ mm/s
- $B = 4$ mm
- $\alpha = 72^\circ$

Schichtdicke

- gemessen: 427 ± 29 μm
- prognostiziert: 434 μm
- Abweichung: 1,6 %

**Bahnplanungsparameter**

- $V = 150$ mm/s
- $B = 6$ mm
- $\alpha = 69^\circ$

Schichtdicke

- gemessen: 376 ± 54 μm
- prognostiziert: 390 μm
- Abweichung: 3,6 %

Abbildung 6.34: Ergebnisse der Kombination von Bahnplanungsparametern für das Schichtsystem WSC-Fe

6.6 Bauteilgeometrie

Die bisher untersuchten Zusammenhänge bei der Beschichtung komplexer Bauteile können nur dann uneingeschränkt für eine Bahnplanung verwendet werden, wenn keine abrupten Änderungen der Bauteilgeometrie auftreten. In diesem Fall muss berücksichtigt werden, dass der Spritzstrahl nicht mehr gleichmäßig auf die Bauteiloberfläche auftrifft und als Folge Effekte, wie ungleichmäßige Spritzabstände und Spritzwinkel, sowie ein Verlust von Spritzmaterial durch Overspray, das Beschichtungsergebnis verändern.

Zur Untersuchung des Einflusses der Bauteilgeometrie auf das Beschichtungsergebnis wurden verschiedene Bauteile mit unterschiedlichen Außenwinkeln und Innenradien unter Einsatz einer vertikalen Bahnstrategie gemäß Kapitel 4.5.2.4 beschichtet. Dabei kam sowohl das Atmosphärische Plasmaspritzen mit dem Schichtsystem WC-12Co, als auch das Lichtbogenspritzen mit dem Schichtsystem WSC-Fe zum Einsatz. Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Versuchsreihen zunächst vorgestellt und anschließend diskutiert.

6.6.1 Ergebnisse des Schichtsystems WC-12Co

In Abbildung 6.35 sind lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasmaspritzten Bauteilen mit den Außenwinkeln $\gamma = 60^\circ - 120^\circ$ dargestellt. Bei der Beschichtung eines Bauteil mit dem Außenwinkel $\gamma = 60^\circ$ wird die Schichtdicke und -qualität deutlich durch die Bauteilgeometrie beeinflusst. Besonders am Übergang der Stirnfläche in die Bauteilschräge (Bereich 2, Abbildung 6.35b) und an der Bauteilspitze (Bereich 3, Abbildung 6.35c) zeigen sich signifikante Änderungen der Schichtstruktur. Im Bereich 2 steigt die durchschnittliche Schichtdicke von knapp $540 \mu\text{m}$ auf $780 \mu\text{m}$ am Übergang in die Bauteilschräge an und fällt oberhalb dessen wieder ab. Zusätzlich wird hier ein Absinken der Kleinlasthärte von knapp $1300 HV_{0,3}$ auf $910 HV_{0,3}$ beobachtet. Im Bereich 3 bildet sich ein keilförmiges Schichtprofil, dessen Schichtdicke mit Annäherung an die Spitze stetig bis auf $150 \mu\text{m}$ abnimmt. Die Porosität und die Rauheit der Schicht bleibt auf dem gesamten Bauteil mit 5% bzw. $R_z = 45 \mu\text{m}$ annähernd konstant.

Bei dem Bauteil mit einem Außenwinkel von $\gamma = 90^\circ$ zeigt sich eine ähnliche Situation. In dem Bereich 2 steigt die Schichtdicke von $550 \mu\text{m}$ auf $710 \mu\text{m}$ am Übergang in die Bauteilschräge an und fällt oberhalb dessen wieder ab (Abbildung 6.35d). Im Bereich 3 zeigt sich ebenfalls ein keilförmiges Profil, dessen Minimum an der Spitze mit

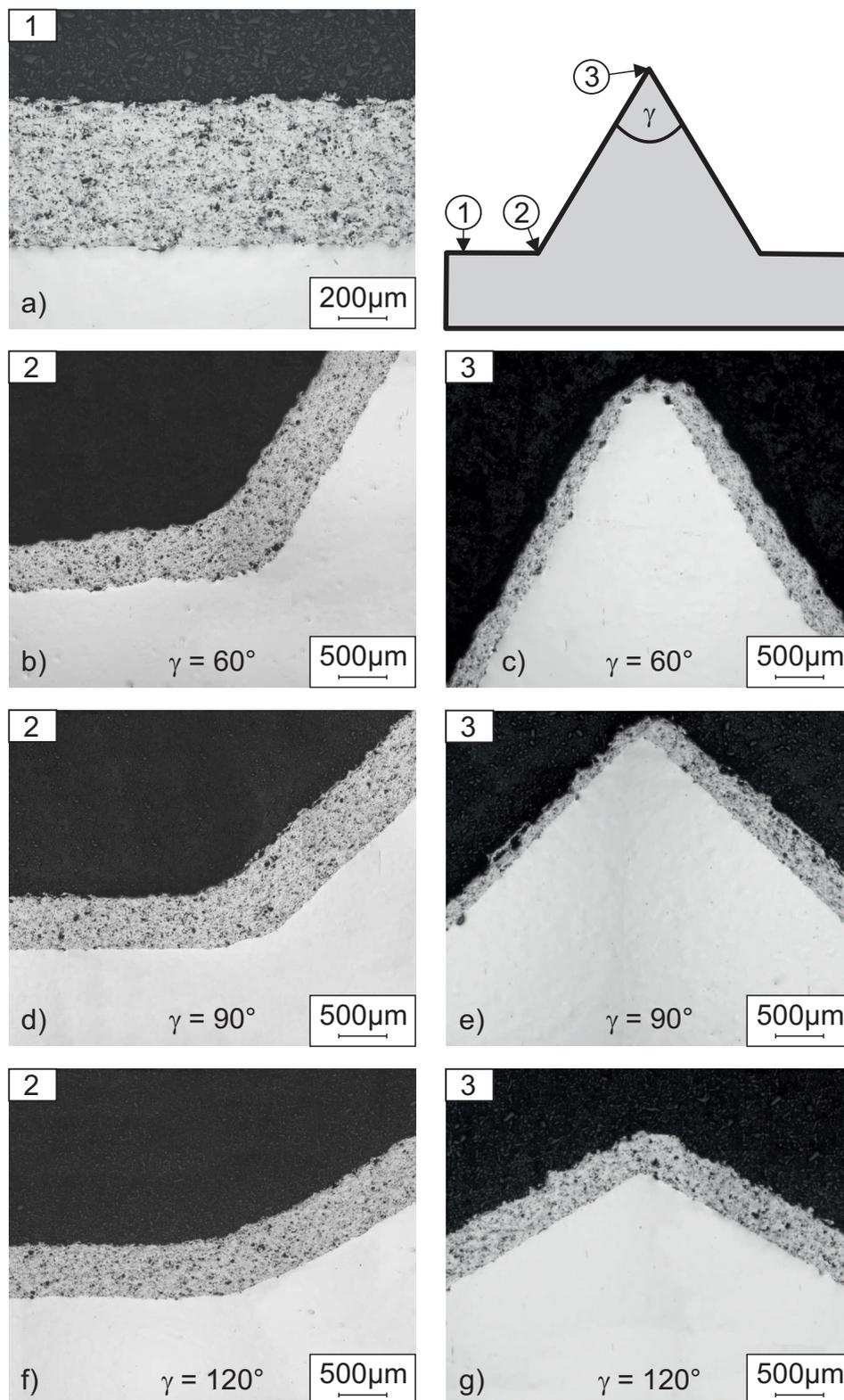


Abbildung 6.35: Lichtmikroskopische Aufnahmen von atmosphärisch plasma-gespritzten (WC-12Co) Bauteilen mit Außenwinkeln. a) Repräsentative Aufnahme der Seitenfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $\gamma = 60^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ und $\gamma = 120^\circ$ an dem Übergang in die Bauteilschräge (Bereich 2) (b, d, f) und an der Bauteilspitze (Bereich 3) (c, e, g)

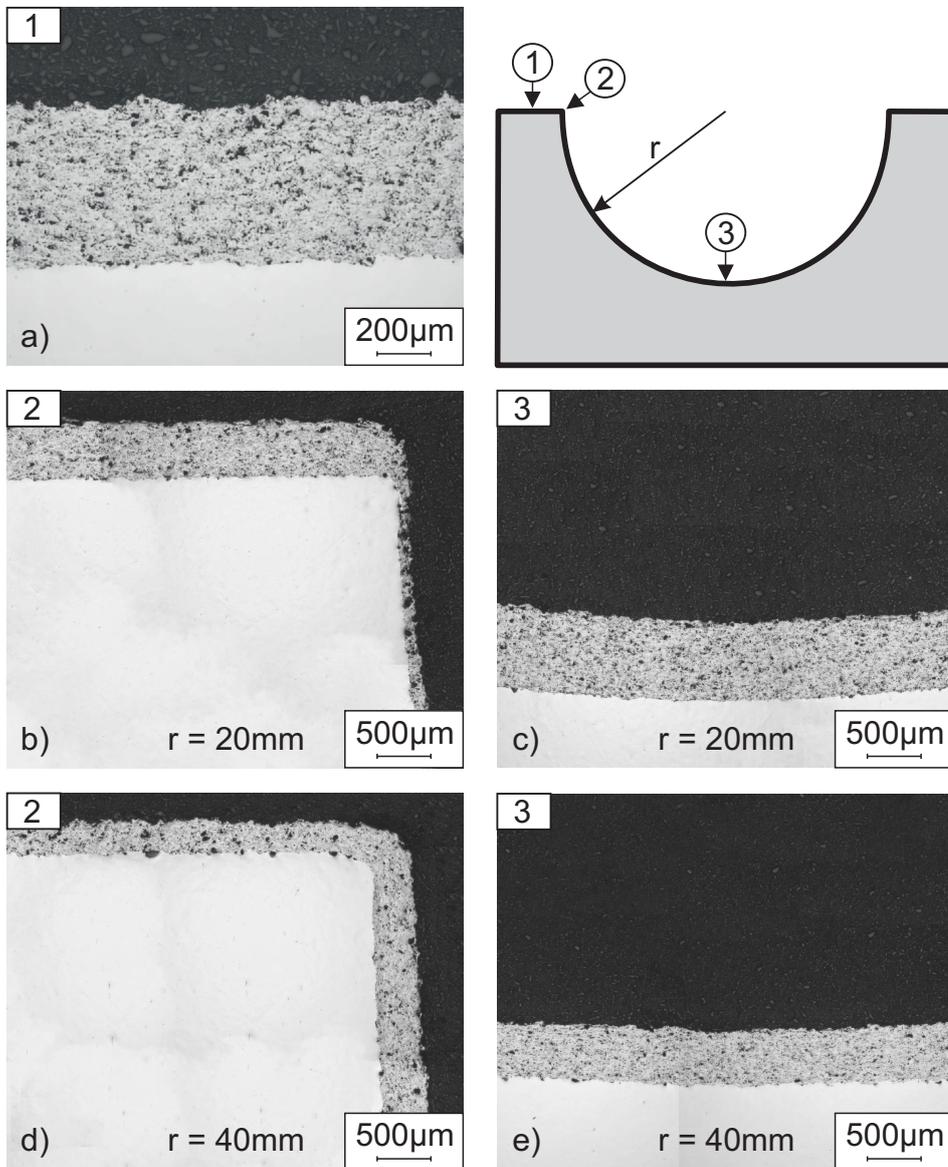


Abbildung 6.36: Lichtmikroskopische Aufnahmen an Querschliffen von atmosphärisch plasmagespritzten (WC-12Co) Bauteilen mit Innenradien. a) Repräsentative Aufnahme der Stirnfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $r = 20\text{ mm}$ und $r = 40\text{ mm}$ an dem Übergang in den Innenradius (Bereich 2) (b, d) und an einem Abschnitt des Kreisbogens (Bereich 3) (c, e)

150 μm liegt (Abbildung 6.35e). Signifikante Änderungen der Härte, der Porosität und der Rauheit werden über die Bauteiloberfläche nicht ermittelt. Sie liegen im Mittel bei 1300 $HV_{0,3}$, 5 % und $R_z = 45 \mu\text{m}$.

Das Bauteil mit dem Außenwinkel $\gamma = 120^\circ$ weist tendenziell eine höhere Schichtdicke als die anderen beiden Bauteile auf. In dem Bereich 2 wird ein Anstieg der Schichtdicke von 600 μm auf 720 μm beobachtet (Abbildung 6.35f). An der Bauteilschräge fällt die Schichtdicke stetig ab, so dass ein keilförmiges Profil entsteht (Abbildung 6.35g). Das Minimum der Schichtdicke wird an der Spitze des Bauteils mit knapp 330 μm erreicht. Die Härte, Porosität und Rauheit ändern sich nicht signifikant auf der Bauteiloberfläche und sind vergleichbar den Werten bei $\gamma = 90^\circ$ und $\gamma = 60^\circ$.

In Abbildung 6.36 sind die Ergebnisse der Beschichtung von Bauteilen mit den Innenradien $r = 20 \text{ mm}$ und $r = 40 \text{ mm}$ dargestellt. Das Bauteil mit dem Innenradius $r = 20 \text{ mm}$ zeigt deutliche Änderungen der Schichtdicke bei dem Übergang von der Stirnfläche in den Innenradius (Abbildung 6.36b). Hier fällt die Schichtdicke von 600 μm auf der Stirnfläche auf minimal 125 μm an der Ecke zu dem Innenradius ab. Mit zunehmender Annäherung an den Bereich 3 (Abbildung 6.36c) steigt die Schichtdicke wieder an und erreicht im unteren Scheitelpunkt eine Maximum von 800 μm . Bei dem Bauteil mit dem Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ tritt ein anderer Verlauf der Schichtdicke auf. An der Stirnfläche wird eine Schichtdicke von ca. 270 μm beobachtet, die beim Eintritt in den Innenradius auf 540 μm anwächst (Abbildung 6.36d). Bei einer Annäherung an den unteren Scheitelpunkt des Innenradius verändert sich die Schichtdicke dagegen nur geringfügig auf 570 μm (Abbildung 6.36e). Die Härte, die Rauheit und die Porosität bleibt bei beiden Innenradien über die gesamte beschichtete Fläche konstant. Gemessen wurde eine Kleinlasthärte von 1300 $HV_{0,3}$, eine Rauheit von $R_z = 80 \mu\text{m}$ und eine Porosität von 5 %. Allerdings wurden zur Vermeidung von Messfehlern die Härte und die Porosität nur in Bereichen mit einer entsprechenden Schichtdicke aufgenommen und die Rauheit konnte mit dem taktilen Messgerät nur an den Stirnflächen ermittelt werden.

6.6.2 Ergebnisse des Schichtsystems WSC-Fe

In Abbildung 6.37 sind die Ergebnisse der Beschichtung von Außenwinkeln mit $\gamma = 60^\circ - 120^\circ$ für das lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe dargestellt. Bei einem Bauteilwinkel von $\gamma = 60^\circ$ steigt die Schichtdicke zunächst steil von 500 μm auf der Stirnfläche (Abbildung 6.37a) bei einer Annäherung an den Übergang zu der Bauteilschräge auf 970 μm in der Ecke an (Abbildung 6.37b). Auf der Bauteilschräge wird

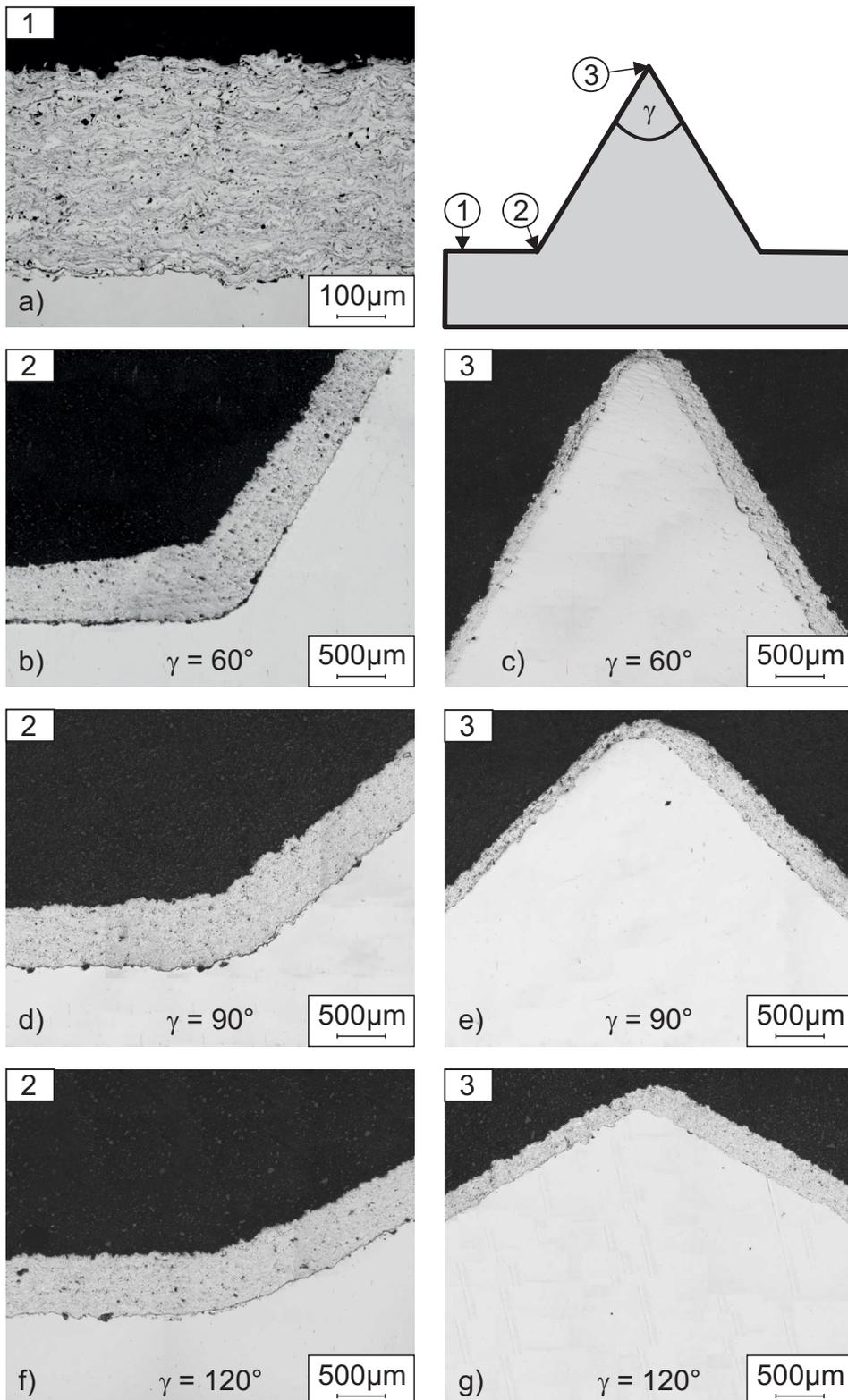


Abbildung 6.37: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten (WSC-Fe) Bauteilen mit Außenwinkeln. a) Repräsentative Aufnahme der Seitenfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $\gamma = 60^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ und $\gamma = 120^\circ$ an dem Übergang in die Bauteilschräge (Bereich 2) (b, d, f) und an der Bauteilspitze (Bereich 3) (c, e, g)

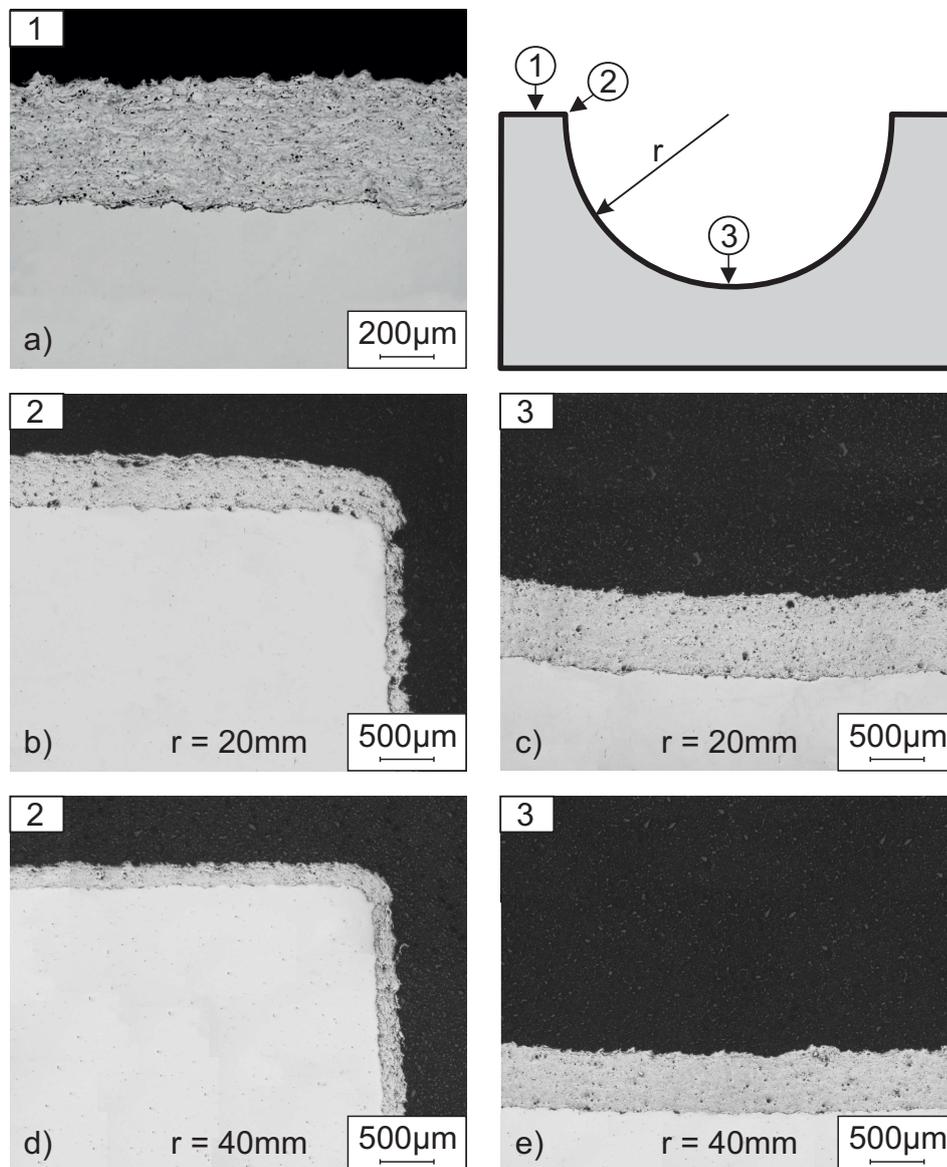


Abbildung 6.38: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten (WSC-Fe) Bauteilen mit Innenradien. a) Repräsentative Aufnahme der Stirnfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf bei $r = 20\text{mm}$ und $r = 40\text{mm}$ an dem Übergang in den Innenradius (Bereich 2) (b, d) und an einem Abschnitt des Kreisbogens (Bereich 3) (c, e)

ein keilförmiger Abfall der Schichtdicke auf minimal $150\ \mu\text{m}$ an der Bauteilspitze beobachtet (Abbildung 6.37c). Die Porosität der Spritzschicht variiert auf der Bauteiloberfläche zwischen 3 % und 5 %. Besonders in dem Bereich 2 wird tendenziell eine höhere Porosität gemessen. Die Härte und Rauheit der Beschichtung ist über die Bauteiloberfläche annähernd konstant. Gemessen wurde eine Rauheit von $R_z = 45\ \mu\text{m}$ und eine Mikrohärtigkeit von $520\ \text{HV}_{0,3}$.

Das Bauteil mit einem Außenwinkel von $\gamma = 90^\circ$ zeigt einen vergleichbaren Verlauf der Schichtdicke über die Bauteiloberfläche. Im Bereich 2 tritt ein Anstieg der Schichtdicke von $500\ \mu\text{m}$ an der Stirnfläche bis hin zu $780\ \mu\text{m}$ an der Ecke zwischen der Stirnfläche und der Bauteilschräge auf (Abbildung 6.37d). An der Bauteilschräge fällt die Schichtdicke ebenfalls keilförmig auf minimal $200\ \mu\text{m}$ bis zu der Bauteilspitze ab (Abbildung 6.37e). Die Härte, Porosität und Rauheit der Spritzschicht entsprechen den Werten bei $\gamma = 60^\circ$. Allerdings wird kein Anstieg der Porosität im Bereich 2 ermittelt.

Bei dem Bauteil mit dem Außenwinkel $\gamma = 120^\circ$ treten korrespondierende Schichtdickenverläufe zu den Bauteilen mit kleineren Winkeln auf. In dem Bereich 2 steigt die Schichtdicke von $500\ \mu\text{m}$ auf $680\ \mu\text{m}$ an der Ecke zwischen der Stirnfläche und der Bauteilschräge an (Abbildung 6.37f). Auf der Bauteilschräge fällt die Schichtdicke wiederum keilförmig auf $240\ \mu\text{m}$ im Bereich der Bauteilspitze ab (Abbildung 6.37g). Die Härte, Porosität und Rauheit entspricht den Werten der anderen Bauteile mit Außenwinkeln.

In Abbildung 6.38 sind lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten Bauteilen mit den Innenradien $r = 20\ \text{mm}$ und $r = 40\ \text{mm}$ dargestellt. Die Schichtdicke auf dem Bauteil mit dem Innenradius $r = 20\ \text{mm}$ ist starken Änderungen unterworfen. Auf der Stirnfläche tritt eine mittlere Schichtdicke von $500\ \mu\text{m}$ auf (Abbildung 6.38b). Beim Eintritt in den Innenradius fällt die Schichtdicke signifikant auf durchschnittlich $180\ \mu\text{m}$ ab und steigt bei einer Annäherung an den unteren Scheitelpunkt auf maximal $840\ \mu\text{m}$ an (Abbildung 6.38c). Bei dem Bauteil mit dem Innenradius $r = 40\ \text{mm}$ ändert sich dagegen die Schichtdicke beim Eintritt in den Innenradius nur geringfügig (Abbildung 6.38d). Auf der Stirnfläche wird eine Schichtdicke von $270\ \mu\text{m}$ gemessen, die marginal an der Ecke zum Innenradius auf $300\ \mu\text{m}$ anwächst. Bei einer Annäherung an den unteren Scheitelpunkt tritt parallel zu dem Innenradius $r = 20\ \text{mm}$ ein steiler Anstieg der Schichtdicke auf $630\ \mu\text{m}$ auf (Abbildung 6.38e).

Beide Bauteile weisen Mikrohärtigkeiten von durchschnittlich $540\ \text{HV}_{0,3}$ auf. Signifikante Härteschwankungen über die Bauteiloberfläche werden nicht beobachtet. Die Porosität der Spritzschichten streut zwischen 3 % und 6 %. Besonders bei dem Bauteil $r = 20\ \text{mm}$ zeigt sich ein leichter Anstieg der Porosität an dem Übergang von der

Stirnfläche in den Innenradius. Die Rauheit der Beschichtungen liegt im Mittel bei $R_z = 50 \mu m$. Prägnante Änderungen der Rauheit treten nicht auf, allerdings konnte die Rauheit verfahrensbedingt nur auf den Stirnflächen und im unteren Scheitelpunkt der Innenradien gemessen werden.

6.6.3 Diskussion der Ergebnisse

Bei der Beschichtung von regelgeometrischen Bauteilen treten deutliche Änderungen der Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche auf. Trotz Einhaltung einer konstanten Verfahrgeschwindigkeit und eines konstanten Bahnabstandes wird eine ausgeprägte Schwankung der Schichtdicke in Bereichen mit Winkeln oder Radien beobachtet.

Auf Bauteilen mit Winkeln zeigen sich grundsätzlich zwei Effekte. Bauteile mit Innenwinkeln weisen einen Anstieg der Schichtdicke bei einer Annäherung an den Winkel auf, während bei Bauteilen mit Außenwinkeln die Schichtdicke im Bereich des Winkels keilförmig abfällt. Die Ursache dafür ist die jeweils unterschiedliche Überlagerung der Spritzprofile im Bereich des Winkels. Bei Innenwinkeln überlagern sich die Spritzprofile stärker als auf einer ebenen Bauteiloberfläche. Besonders die dem Winkel zugewandte Seite des Spritzprofils beschichtet die nähere Umgebung des Innenwinkels mehrfach. Eine Prinzipskizze dieses Vorgangs ist in Abbildung 6.39a dargestellt. Dieser Effekt tritt um so ausgeprägter auf, je spitzer der Innenwinkel des Bauteils ist. Gemessen wurde ein Anstieg der Schichtdicke im Bereich des Innenwinkels bei $\gamma = 60^\circ$ um bis zu 100 %, während bei $\gamma = 120^\circ$ nur noch ein Anstieg um maximal 40 % auftritt. Bei Bauteilen mit Außenwinkeln zeigt sich eine andere Beschichtungssituation. Nähert sich die Spritzpistole dem Außenwinkel, so trifft nicht mehr der gesamte Spritzstrahl gleichmäßig auf das Bauteil auf und ein Teil des Strahls geht als Overspray verloren (Abbildung 6.39b). Folglich sinkt die Schichtdicke ab und es bildet sich ein keilförmiges Schichtprofil aus. Genau wie bei Bauteilen mit Innenwinkeln ist die Schichtdicke um so stärkeren Änderungen unterworfen, je spitzer der Außenwinkel ist. Bei Bauteilen mit $\gamma = 60^\circ$ tritt ein Abfall um bis zu 70 % auf, während bei $\gamma = 120^\circ$ ein Abfall um maximal 50 % beobachtet wird.

Bei den Bauteilen mit Innenwinkeln wird die Schwankung der Schichtdicke zusätzlich durch die Größe des Öffnungswinkel des Spritzstrahls beeinflusst. Bei einem größeren Öffnungswinkel überlagern sich am Innenwinkel mehrere Spritzprofile und folglich tritt neben dem Anstieg der absoluten Schichtdicke auch ein Anstieg der Schichtdicke über einen längeren Bereich auf. Bei Bauteilen mit Außenwinkeln wird dagegen bei einem größeren Öffnungswinkel nur ein Abfall der Schichtdicke über einen längeren

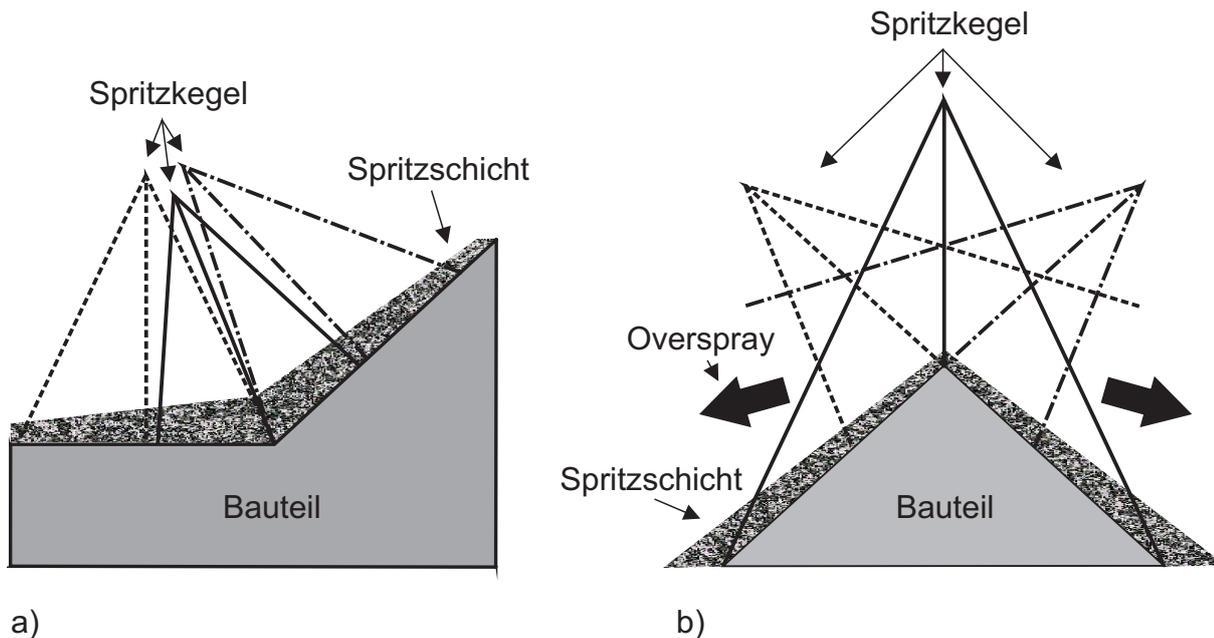


Abbildung 6.39: Geometrische Überlagerung der Spritzprofile bei der Beschichtung von a) Innenwinkeln und b) Außenwinkeln

Bereich beobachtet. Signifikante Änderungen in der absoluten Schichtdicke können nicht festgestellt werden. Dementsprechend reagiert der Lichtbogenspritzprozess mit einem großen Öffnungswinkel von $\sim 12^\circ$ stärker auf Änderungen der Bauteilkontur als der Atmosphärische Plasmaspritzprozess mit einem Öffnungswinkel von $\sim 9^\circ$.

Die Beschichtung der Bauteile mit Innenradien konnte nur durchgeführt werden, in dem der Spritzwinkel an den Übergängen zwischen Bauteilradius und Stirnfläche stückweise verringert wurde. Andernfalls wäre die Beschichtungspistole bei einem Beschichtungsvorgang gegen das Bauteil gestoßen oder der Spritzstrahl hätte die gegenüberliegende Seite ungeplant beschichtet. Eine derartige Problematik wird besonders bei Bauteilen mit einer konvexen Oberfläche beobachtet [ZS04]. In Abbildung 6.40 sind die realisierten Spritzwinkel in den Innenradien der Bauteile dargestellt. Bei dem Bauteil mit dem Innenradius $r = 20 \text{ mm}$ wurde der Spritzwinkel von 90° im unteren Scheitelpunkt bis auf 45° an der Ecke zwischen Stirnfläche und Innenradius verringert. Bei dem Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ wurde dagegen der Spritzwinkel nur an dem Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius auf minimal 60° abgesenkt. Als Folge davon sinkt die Schichtdicke bei dem Radius $r = 20 \text{ mm}$, konform zu den Ergebnissen aus Kapitel 6.1, wesentlich stärker ab. Durch den Spritzwinkel von 45° im Innenradius am Übergang zu der Stirnfläche bildet sich bei dem Bauteil mit einem Radius $r = 20 \text{ mm}$ zusätzlich ein starker Overspray auf der Stirnfläche des Bauteils und die Schichtdicke erhöht sich. Bei dem Radius $r = 40 \text{ mm}$ wurde an dieser Stelle ein An-

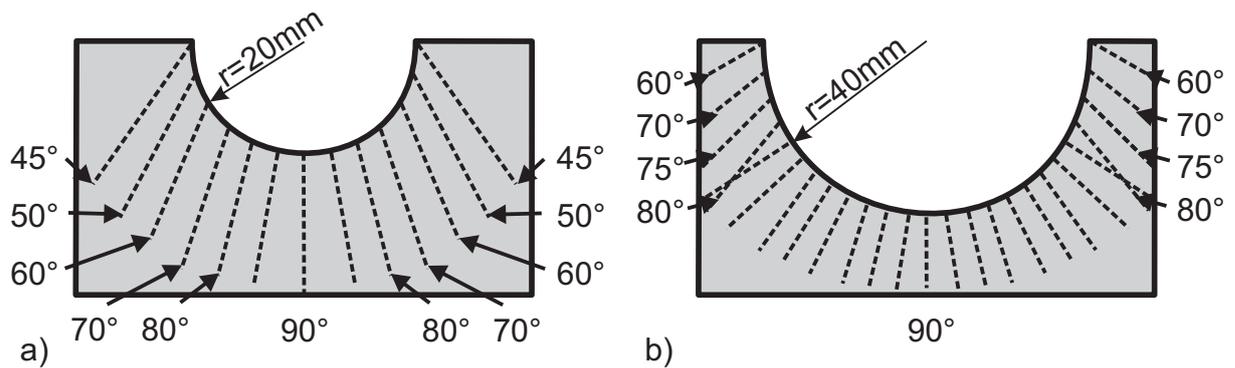


Abbildung 6.40: Anstellwinkel der Spritzpistole bei der Beschichtung von Bauteilen mit einem Innenradius von a) $r = 20\text{mm}$, b) $r = 40\text{mm}$

stellwinkel von 60° verwendet. Der korrespondierende Spritzwinkel auf der Stirnfläche beträgt daher nur 30° und folglich trägt weniger Overspray zu der Schichtbildung bei. Im unteren Scheitelpunkt des Innenradius wird darüberhinaus beobachtet, dass besonders bei dem Innenradius $r = 20\text{mm}$, die Schichtdicke stark ansteigt. Dies wird durch ein ähnliches Phänomen wie bei den Bauteilen mit Innenwinkeln verursacht. Die einzelnen Spritzbahnen sind im unteren Bereich des Innenradius durch die Änderung der Bauteilkontur gegeneinander verkippt. Dadurch tritt hier eine starke Akkumulation der Spritzprofile auf und die Schichtdicke steigt an. Außerdem trifft Overspray von der Beschichtung der Seitenfläche auf diesen Bereich auf und verstärkt dadurch das Wachstum der Beschichtung. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Thermischen Spritzverfahren können auf den Bauteilen mit Innenradien nicht beobachtet werden.

Die Beschichtungen weisen bei allen Bauteilgeometrien gleichmäßige mikrostrukturelle Eigenschaften auf. Die gemessenen Härten, Rauheiten und Porositäten sind vergleichbar zu den Werten von Spritzschichten auf ebenen Substraten. Nur bei Innenwinkeln mit $\gamma = 60^\circ$ und Innenradien mit $r = 20\text{mm}$ tritt ein leichter Anstieg der Porosität an den Ecken auf.

6.7 Bahnstrategie

Der Einfluss der Bahnstrategie auf das Beschichtungsergebnis wurde anhand eines Modellversuchs an Bauteilen mit einem Innenradius von $r = 40\text{mm}$ überprüft. Diese Bauteile wurden mit zwei unterschiedlichen Bahnstrategien mit plasmagespritztem WC-12Co beschichtet. Bei der Offline-Programmierung der Beschichtungsversuche wurden als Randbedingungen für die Bahnplanung eine konstante

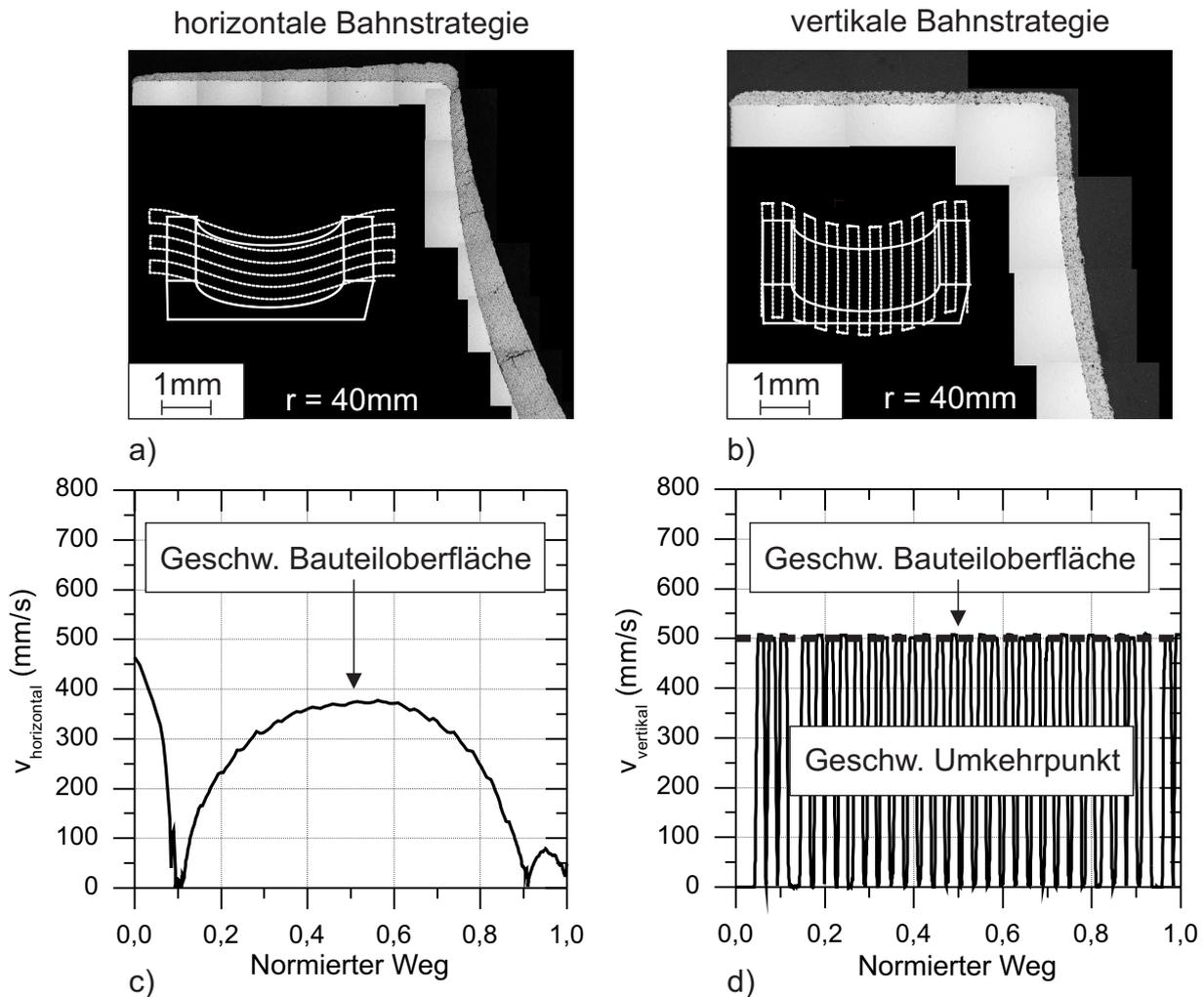


Abbildung 6.41: Einfluss der Bahnstrategie bei der Beschichtung regelgeometrischer Bauteile. Lichtmikroskopische Querschliffe der a) horizontalen Bahnstrategie, b) vertikalen Bahnstrategie, c), d) Auswertung der Bahngeschwindigkeit der Spritzpistole auf der Bauteiloberfläche

Verfahrensgeschwindigkeit, ein konstanter Bahnabstand, ein konstanter Spritzabstand und Spritzwinkel entsprechend Abbildung 6.40b voreingestellt.

Beim Einsatz der ersten Bahnstrategie verfährt der Roboter horizontal entlang der Bauteilkrümmung (Abbildung 6.41a). Hierbei muss der Roboter starke Umorientierungen der Spritzpistole auf der Bauteiloberfläche vornehmen, um einen möglichst konstanten Spritzwinkel und Spritzabstand realisieren zu können. Dabei muss die vorgegebene Bahngeschwindigkeit auf jedem Punkt der Bauteiloberfläche gehalten werden, um damit einen gleichmäßigen Schichtauftrag zu gewährleisten. Die tatsächliche Verfahrensgeschwindigkeit des Beschichtungsroboters auf der Bauteiloberfläche wurde anhand einer präzisen und zeitlich hochauflösenden Robotersimulation des Roboterherstellers

genauer analysiert¹. Dazu wurden aus der Simulation die Bewegungsdaten in einem Zeitraster von 4 ms abgeleitet. Diese wurden dann für geometrische Berechnungen herangezogen, die u. a. die Auswertung der effektiven Geschwindigkeit des Partikelstrahls entlang der Oberfläche ermöglicht [TKV⁺10]. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 6.41c dargestellt.

Durch die Simulation lässt sich unmittelbar erkennen, dass die voreingestellte Verfahrgeschwindigkeit von 500 mm/s auf der gesamten Bauteiloberfläche nicht erreicht wurde. Bei dem in der Abbildung dargestellten Überlauf der Spritzpistole wurde die Beschichtung auf der linken Seite außerhalb des Werkstückes gestartet. Dementsprechend erreicht der Roboter die linke Stirnfläche mit annähernd 500 mm/s, muss dann aber direkt verzögern, um die Wendestelle an dem Übergang zu dem Innenradius maßgenau abfahren zu können. Hierbei geht die Verfahrgeschwindigkeit gegen Null. Bei dem Eintritt in den Innenradius beschleunigt der Roboter wiederum bis zu dem unteren Scheitelpunkt des Innenradius und verzögert danach, bis an dem Übergang zu der rechten Stirnfläche die Geschwindigkeit erneut gegen Null geht, bevor er auf der rechten Stirnfläche abermals beschleunigt. Aufgrund des kurzen Verfahrweges auf der Stirnfläche wird die voreingestellte Geschwindigkeit nicht erreicht. Diese deutlichen Abweichungen von der voreingestellten Verfahrgeschwindigkeit werden durch eine technische Limitierung des Beschichtungsroboters verursacht. Diese führt dazu, dass Bewegungen, die ein hohes Drehmoment der Roboterachsen benötigen, von den Servomotoren nicht richtig ausgeführt werden [FDLC10].

Die Schwankungen in der Verfahrgeschwindigkeit spiegeln sich in der resultierenden Beschichtung wieder (Abbildung 6.41a). Auf den Stirnflächen zeigt sich ein keilförmiger Anstieg der Schichtdicke. Die Schicht weist hier gute, der Optimierungsphase vergleichbare, Schichteigenschaften auf. Im Bereich des Innenradius treten hingegen als Folge der geringen Verfahrgeschwindigkeit hohe Schichtdicken mit starken thermisch induzierten Verspannungen des Gefüges auf (vgl. Kapitel 6.4), so dass ein ausgeprägtes Risswachstum beobachtet wird.

Mit der Robotersimulation wurde ebenfalls die tatsächliche Verfahrgeschwindigkeit auf der Bauteiloberfläche, bei Einsatz der horizontalen Bahnstrategie aus Kapitel 6.6, überprüft. In Abbildung 6.41d ist das Ergebnis der Auswertung für das Bauteil mit dem Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ dargestellt. Die horizontale Bahnstrategie ermöglicht bei einem Beschleunigungsweg von 70 mm eine konstante Verfahrgeschwindigkeit auf der

¹Die Bahngeschwindigkeitsdaten wurden freundlicherweise vom Lehrstuhl für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung (IRPA) der Technischen Universität Dortmund zur Verfügung gestellt.

gesamten Bauteiloberfläche. Ein Absinken der Verfahrgeschwindigkeit tritt nur bei der Umorientierung der Spritzpistole außerhalb des Bauteils auf. Infolgedessen bildet sich eine relativ gleichmäßige Beschichtung mit den in Kapitel 6.41 diskutierten Eigenschaften.

6.8 Schlussfolgerung

Aus den Untersuchungen der Einflussfaktoren bei der Beschichtung komplexer Bauteile können wichtige Rückschlüsse für die Bahnplanung gezogen werden. Eine gleichmäßige Schichtdicke mit konstanten Schichteigenschaften auf der gesamten Bauteiloberfläche lässt sich nur dann realisieren, wenn alle Handhabungsparameter der Bahnplanung berücksichtigt und der jeweiligen Bauteilgeometrie angepasst werden. Geringfügige Abweichungen eines Parameters vom Sollwert können zum Teil drastische Auswirkungen auf das Beschichtungsergebnis haben. Handhabungsparameter können ebenfalls dazu genutzt werden, um die Eigenschaften der Beschichtung gezielt einzustellen. Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse der Untersuchungen kurz zusammengefasst:

- Ein Spritzwinkel von $\alpha = 90^\circ$ führt bei einem Lichtbogenspritzprozess zu den besten Schichteigenschaften. Bei einem Plasmaspritzprozess ist dagegen, aufgrund der radialen Pulvereindüsung, der optimale Spritzwinkel zu kleineren Werten verschoben. Ist eine Abänderung des Spritzwinkels nötig, so sollte beim Atmosphärischen Plasmaspritzen ein Grenzwinkel von 50° und beim Lichtbogenspritzen ein Grenzwinkel von 60° nicht unterschritten werden. Andernfalls treten bei beiden Spritzprozessen deutliche Verschlechterungen der Schichteigenschaften auf.
- Der Spritzabstand ist bei beiden Spritzprozessen am Optimalwert konstant zu halten. Eine Abänderung des Spritzabstandes beeinflusst die Schichtdicke, Schichtstruktur und -topographie, sowie die Phasenzusammensetzung der Beschichtung deutlich. Beim Atmosphärischen Plasmaspritzen treten diese Änderungen in einem relativ engen Bereich auf, während sie bei dem Lichtbogenspritzen bis hin zu großen Spritzabständen beobachtet werden. Besonders Spritzabstände unterhalb von 50 mm oder weit oberhalb des Optimalwertes sind bei beiden Spritzverfahren zu vermeiden.
- Über den Bahnabstand kann die Schichtdicke in weiten Bereichen eingestellt werden, da ein hyperbolischer Anstieg der Schichtdicke bei einer Verringerung

des Bahnabstandes auftritt. Ursache dafür ist die geometrische Überlagerung der Spritzprofile. Die äußeren Grenzen des Bahnabstandes sind bei beiden Spritzverfahren 3 mm und 9 mm. Unterhalb von 3 mm wird das Substrat übermäßig aufgeheizt, während oberhalb von 9 mm die Konturgenauigkeit der Beschichtung verloren geht.

- Die Verfahrensgeschwindigkeit ist eine wichtige Größe zur Anpassung der Schichtdicke. Sie kann zwischen 333 mm/s - 833 mm/s beim Atmosphärischen Plasmaspritzen und zwischen 100 mm/s - 350 mm/s beim Lichtbogenspritzen frei gewählt werden, ohne dass merkbliche Änderungen in der Schichtqualität auftreten. Bei sehr geringen Verfahrensgeschwindigkeiten tritt allerdings eine starke thermische Belastung des Substrates auf.
- Die Bahnplanungsparameter Spritzwinkel, Bahnabstand und Verfahrensgeschwindigkeit können miteinander kombiniert werden, um eine unvermeidbare Änderung eines Parameters durch einen zweiten Parameter zu kompensieren. Durch eine Verknüpfung der empirisch ermittelten Funktionen kann dabei der benötigte Wert eines Bahnparameters prognostiziert werden.
- Die Bauteilkontur beeinflusst das Beschichtungsergebnis deutlich. Besonders spitze Winkel und kleine Radien sind bei der Bauteilkonstruktion zu vermeiden, da an ihnen hohe Schwankungen der Schichtdicke auftreten. Bei der Beschichtung von Bauteilen mit Innenwinkel werden unterschiedliche Schichtdickenverläufe zwischen dem Plasmaspritzen und dem Lichtbogenspritzen beobachtet, die ein Resultat der verschiedenen Öffnungswinkel der Spritzflammen sind. Dagegen zeigen sich auf Bauteilen mit Außenwinkeln oder mit Innenradien keine signifikanten Unterschiede zwischen den Spritzverfahren.
- Die Bahnstrategie muss an die Bauteilgeometrie angepasst werden, da ansonsten bei der Beschichtung von Bauteilen mit starken Richtungsänderungen der Oberfläche, die tatsächliche Geschwindigkeit des Beschichtungsroboters, von dem voreingestellten Wert abweicht. Ursache dafür ist eine technische Limitierung der Servomotoren des Beschichtungsroboters. Als Ergebnis treten Unregelmäßigkeiten in dem Schichtdickenverlauf auf.

Kapitel 7

Beschichtung komplexer Bauteile

In diesem Kapitel werden Fallstudien vorgestellt, in denen die Erkenntnisse aus Kapitel 6 systematisch genutzt wurden, um komplexe Bauteile endkonturnah zu beschichten. Hierbei wurde exemplarisch der Lichtbogenspritzprozess mit dem Schichtsystem WSC-Fe eingesetzt. Als Probekörper wurden im Rahmen der Arbeiten **Bauteile mit Außenwinkeln und Bauteile mit Innenradien**, analog zu den Regelgeometrien aus Kapitel 6.6, sowie ein **freigeformtes Modell-Tiefziehwerkzeug** zur Blechteilefertigung für die Automobilindustrie, verwendet. Die Fallstudien zielten darauf ab, die Potenziale des Lichtbogenspritzprozesses zur endkonturnahen Bauteilbeschichtung aufzuzeigen und gleichzeitig die Grenzen des Prozesses zu erarbeiten.

Die Planung und Realisierung der Bauteilbeschichtung wurde bei allen Probekörpern mit einer ähnlichen Vorgehensweise durchgeführt. Im ersten Schritt wurde die Beschichtungsbahn mittels Offline-Bahnplanungssoftware erzeugt. Hierbei wurde in einem speziell für die Bahnplanung entwickelten Programm, durch eine Vorgabe der relevanten Randbedingungen wie Verfahrgeschwindigkeit, Spritzwinkel, Spritzabstand oder Bahnabstand, eine mäanderförmige Bahn auf eine CAD-Zeichnung der zu beschichtenden Bauteiloberfläche gelegt. Diese Bahn wurde danach in die Bahnplanungssoftware des Roboterherstellers importiert und dort mit der CAD-Zeichnung der Beschichtungszelle verknüpft. Anschließend wurde anhand der Spritzbahn ein Roboterprogramm erzeugt und dieses auf die Robotersteuerung übertragen. Unmittelbar nach einer kurzen, manuellen Anpassung der Beschichtungsbahn an die Begebenheiten in der tatsächlichen Beschichtungszelle konnte das Programm dann ausgeführt werden.

Unter Einsatz der geplanten Beschichtungsstrategie wurden anschließend die Probekörper mit den optimierten Spritzparametern aus Kapitel 5.2 beschichtet. Anhand von

metallographischen Schliffen wurde dann eine Auswertung der Schichtdicken- und Schichtqualitätsverteilung auf der Bauteiloberfläche durchgeführt und gegebenenfalls die Bahnstrategie, durch eine Variation der Handhabungsparameter Verfahrensgeschwindigkeit, Spritzwinkel, Bahnabstand und Spritzabstand, angepasst. Die in Kapitel 5 optimierten Spritzparameter wurden dabei an dem Optimalwert konstant gehalten.

Als erstes wurde jeweils der Handhabungsparameter Verfahrensgeschwindigkeit angepasst, da dieser Parameter in einem bestehenden Programm unkompliziert in weiten Grenzen abgeändert werden kann, ohne das signifikante Qualitätseinbußen der Beschichtung auftreten (vgl. Kapitel 6). Anschließend wurden zum Teil noch weitere Anpassungen der Bahnstrategie durch eine gezielte Variation des Spritzabstandes oder des Spritzwinkels vorgenommen. Auf dem Umformwerkzeugsegment wurde zudem eine Anpassung der Schichtdicke durch das Hinzufügen zusätzlicher Überläufe sowie durch eine Abänderung des Bahnabstandes durchgeführt.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse der Bauteilbeschichtung vorgestellt. Dazu werden bei den unterschiedlichen Bauteilen anhand ausgesuchter Beschichtungsstrategien der Verlauf der Schichtdicke und der Schichtmikrostruktur über die Bauteiloberfläche diskutiert.

7.1 Regelgeometrische Bauteile

Als Ausgangspunkt für die Bauteilbeschichtung wurden Strategien entwickelt, um die in Kapitel 6.6 vorgestellten Regelgeometrien mit einer gleichmäßigen Schichtdicke und einer gleichbleibenden Schichtqualität auf der gesamten Bauteiloberfläche zu beschichten. Dabei haben sich grundlegende Unterschiede zwischen dem Bauteil mit einem Außenwinkel und dem Bauteil mit einem Innenradius aufgezeigt, die in diesem Abschnitt diskutiert werden.

7.1.1 Außenwinkel

Die Ergebnisse der Bauteilbeschichtung aus Kapitel 6.6 zeigen, dass an Bauteilen mit Außenwinkeln, bei dem Einsatz einer mäanderförmigen Bahnstrategie und einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit, Schwankungen der Schichtdicke im Bereich der Winkel auftreten, welche umso stärker ausgeprägt sind, je spitzer der Bauteilwinkel ist. Daher zeigt insbesondere das Bauteil mit dem Außenwinkel $\gamma = 60^\circ$ deutliche Schwan-

kungen in der Schichtdicke, während auf dem Bauteil mit dem Außenwinkel $\gamma = 120^\circ$ nur marginale Änderungen der Schichtdicke auftreten.

Zur Optimierung der Schichtdicke und -qualität auf der Bauteiloberfläche wurde daher ein Bauteil mit einem mittleren Außenwinkel von $\gamma = 90^\circ$ gewählt. Bei diesem Außenwinkel treten deutliche Änderungen der Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche auf. Diese sind allerdings nicht derart stark ausgeprägt wie bei dem Außenwinkel $\gamma = 60^\circ$, so dass eine endkonturnahe Beschichtung durchaus realistisch durchführbar ist. In der Fachliteratur wird allerdings berichtet, dass beim Thermischen Spritzen Bauteile mit Ecken oder kleinen Radien möglichst nicht eingesetzt werden sollten, da an diesen Bereichen drastische Änderungen der Schichtdicke und -qualität auftreten [Sul05]. Es lässt sich jedoch keine Studie finden, in der systematisch die Beschichtungsstrategie an einen derartigen Bereich angepasste wurde. In dieser Fallstudie sollte daher überprüft werden, ob prinzipiell eine endkonturnahe Beschichtung eines Bauteils mit Winkeln möglich ist.

Bei einer konventionellen Beschichtung des Außenwinkels $\gamma = 90^\circ$ mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit von $V = 200 \text{ mm/s}$ ändert sich die Schichtdicke insbesondere in den Bereichen der Innenwinkel zwischen Stirnflächen und Bauteilschräge sowie an dem Außenwinkel zwischen den beiden Bauteilschrägen. In Abbildung 7.1 ist der Verlauf der Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche beim Einsatz der konventionellen Bahnstrategie als gestrichelte Linie dargestellt. Deutlich lässt sich erkennen, dass an den Innenwinkeln eine Überhöhung der Schichtdicke und an dem Außenwinkel ein Absinken der Schichtdicke, verursacht durch die abrupte Änderung der Bauteilnormalen im Bereich der Winkel, auftritt. Dadurch überlagern sich die Spritzprofile anders als auf einer ebenen Bauteiloberfläche. Genauere Details hierzu können im Kapitel 6.6 nachgelesen werden.

Die Schwankung der Schichtdicke im Bereich der Winkel kann signifikant verbessert werden, indem eine angepasste Bahnstrategie verwendet wird. Bei dieser Strategie wird die Verfahrensgeschwindigkeit im Bereich der Innenradien stückweise erhöht und an dem Außenradius stückweise abgesenkt. Als Folge davon wird im Bereich der Innenradien eine annähernd konstante Schichtdicke erzielt, deren Schwankungen in der Größenordnung der Rauheit liegen (durchgezogene Linie in Abbildung 7.1). An dem Außenwinkel kann mit der angepassten Verfahrensgeschwindigkeit ebenfalls eine deutliche Homogenisierung der Schichtdicke erreicht werden. Allerdings zeigt sich an der Ecke zwischen den Bauteilschrägen nach wie vor ein geringer Abfall der Schichtdicke. Durch ein weiteres Absenken der Verfahrensgeschwindigkeit kann hier keine Verbesserung des Beschichtungsergebnisses erzielt werden, da sich durch den recht hohen Öff-

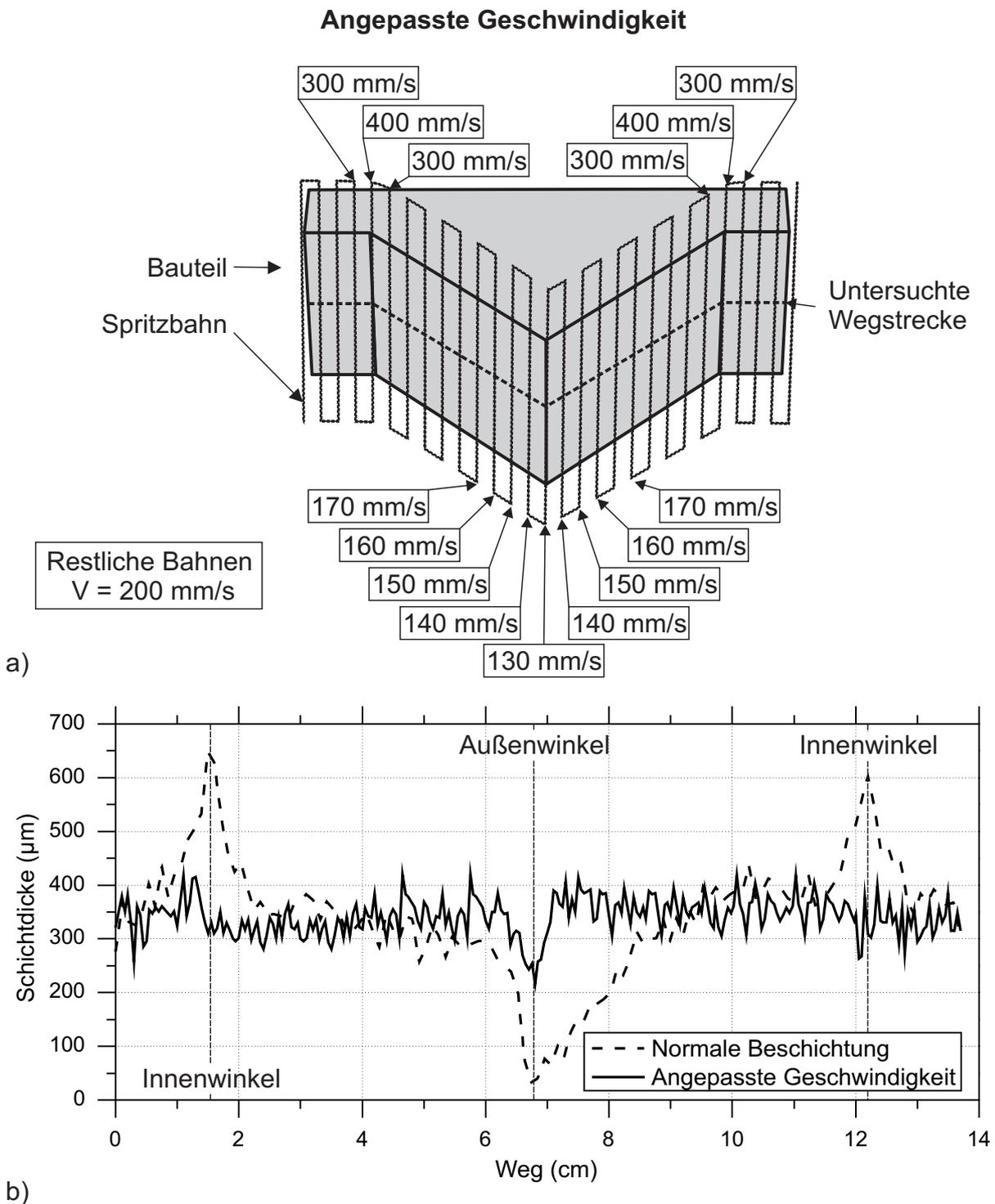


Abbildung 7.1: Optimierung eines regelgeometrischen Bauteils mit einem Außenwinkel von $\alpha = 90^\circ$ durch Variation der Verfahrensgeschwindigkeit. Darstellung der a) angepassten Bahnstrategie und b) der gemessenen Schichtdicke

nungswinkel des Lichtbogenstrahls gleichzeitig die Schichtdicke im oberen Drittel der Bauteilflanke überhöht.

Die Anpassung der Verfahrgeschwindigkeit lässt sich mit dem in Kapitel 6.4 empirisch ermittelten Zusammenhang zwischen der Auftragsrate und der Verfahrgeschwindigkeit durchführen (Gleichung 6.12).

$$A_{WSC-Fe}(V) = 45136,79 \cdot V^{-1,02}$$

Für eine unkomplizierte Berechnung der Verfahrgeschwindigkeit kann diese Formel vereinfacht werden. Dazu werden die Auftragsraten zu zwei unterschiedliche Verfahrgeschwindigkeiten dividiert. Dabei kann der empirisch ermittelte Exponent der Verfahrgeschwindigkeit von 1,02 in guter Näherung durch eine Eins vereinfacht werden:

$$\frac{A_1(V) = 45136,79 \cdot V_1^{-1,02}}{A_2(V) = 45136,79 \cdot V_2^{-1,02}} \Leftrightarrow \frac{A_1(V)}{A_2(V)} = \frac{V_2^{1,02}}{V_1^{1,02}} \approx \frac{V_2}{V_1}$$

Die Auftragsrate A bei einer bestimmten Verfahrgeschwindigkeit ist proportional zu der Schichtdicke D . Daher kann die folgende Faustformel zur Ermittlung der korrekten Verfahrgeschwindigkeit V_2 bei der Vorgabe einer gemessenen Schichtdicke D_1 und der dazugehörigen Verfahrgeschwindigkeit V_1 , sowie einer Soll-Schichtdicke D_2 , verwendet werden:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (7.1)$$

Mit dieser Faustformel kann ein guter Startwert für die Anpassung der Verfahrgeschwindigkeit berechnet werden. Im Bereich der Innenwinkel konnte mit ihr die korrekte Verfahrgeschwindigkeit vorausgesagt werden. Am Außenwinkel musste hingegen nachträglich eine manuelle Anpassung der Verfahrgeschwindigkeit durchgeführt werden. Generell verringert sich die Genauigkeit dieser Faustformel, wenn abrupte Änderungen der Bauteilnormalen auftreten.

Eine noch höhere Endkonturnähe der Beschichtung an dem Außenwinkel konnte durch eine Verlängerung der Mäanderbahn über den Bauteilrand hinaus erreicht werden. Diese Idee basiert auf den Ergebnissen aus dem Kapitel 6.2.3. Hier wurde festgestellt, dass an Bauteilrändern eine Auslaufzone notwendig ist, da andernfalls ein Abfall der Schichtdicke auftritt. Der Außenwinkel stellt ebenfalls gewissermaßen einen Bauteilrand dar und so ist zu erwarten, dass durch eine Auslaufzone ein Abfall der

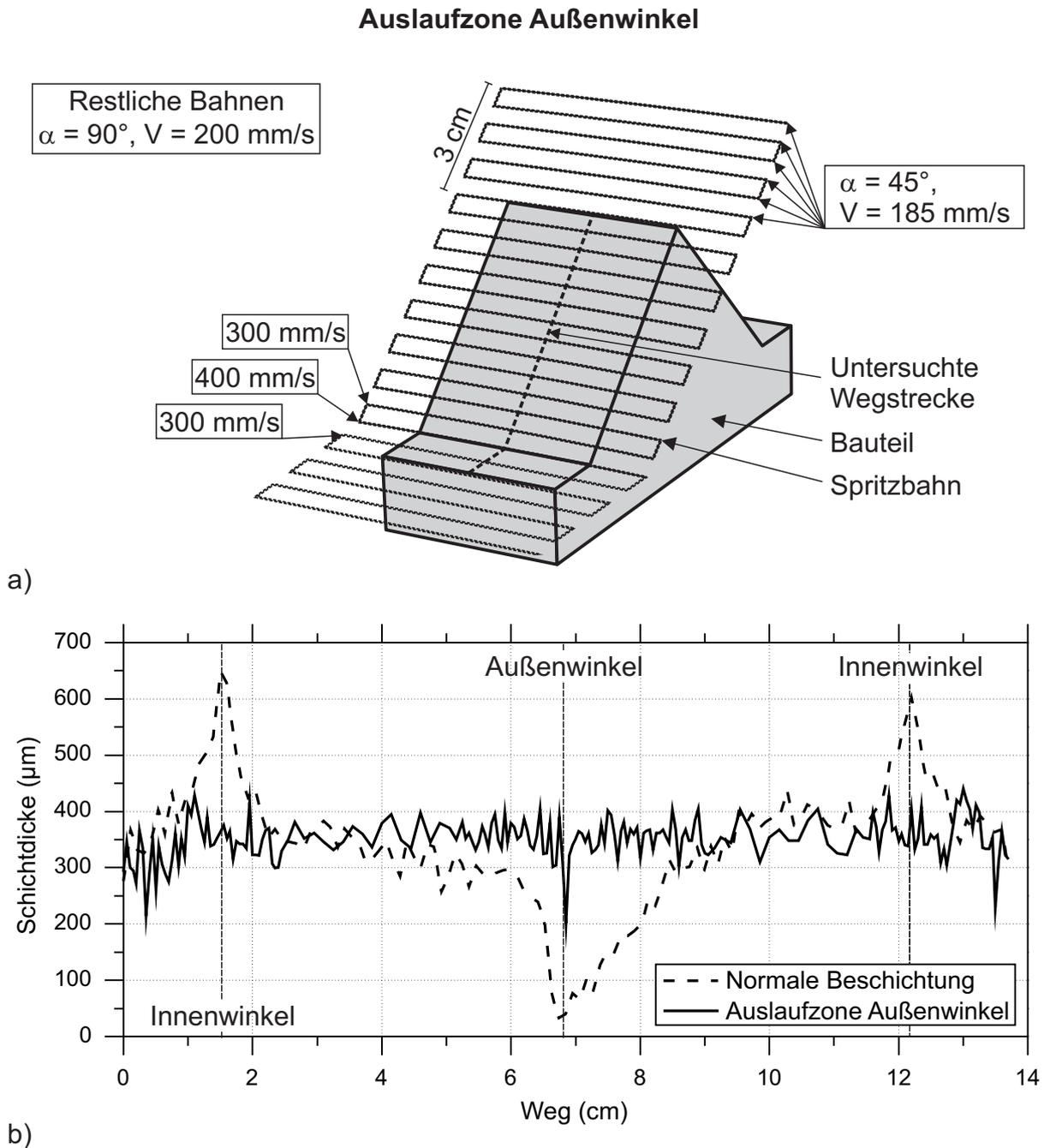


Abbildung 7.2: Verringerung des Schichtdickenabfalls am Außenwinkel $\alpha = 90^\circ$ durch Beschichtung mit einer Auslaufzone. Darstellung der a) angepassten Bahnstrategie (Die hintere Bauteilflanke wird spiegelsymmetrisch beschichtet) und b) der gemessenen Schichtdicke

Schichtdicke in der unmittelbaren Umgebung des Winkels verringert werden kann. Um zu verhindern, dass die Spritzpistole beim Überfahren der Auslaufzone die gegenüberliegende Seite des Bauteils mitbeschichtet, wurde auf der gesamten Auslaufzone der Spritzwinkel auf $\alpha = 45^\circ$ abgesenkt. Dieser Effekt tritt insbesondere bei stumpfen Außenwinkeln stark ausgeprägt auf und wurde daher mit Hinblick auf die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse in diesen Versuchen berücksichtigt. Parallel dazu wurde die Verfahrgeschwindigkeit auf der Auslaufzone mittels der Gleichung 6.4 angepasst und auf $V = 185 \text{ mm/s}$ gesenkt. Dadurch konnte ein gleichmäßiger Schichtauftrag gewährleistet werden. In Abbildung 7.2 ist die resultierende Schichtdicke der derartig angepassten Bahnstrategie dargestellt. Durch die Auslaufzone weist die Beschichtung an dem Außenwinkel eine wesentlich homogenere Schichtdicke auf. Lediglich direkt an dem Übergang zwischen den Bauteilflanken fällt die Schichtdicke geringfügig ab. Dieser Schichtdickenabfall kann jedoch aufgrund des recht hohen Öffnungswinkels des Lichtbogenspritzprozesses nicht kompensiert werden, ohne das gleichzeitig an den Bauteilflanken eine unerwünschte Schichtüberhöhung auftritt.

Zur Überprüfung der Schichtqualität beim Einsatz der unterschiedlichen Bahnstrategien wurden metallographische Schlitze der Beschichtungen visuell begutachtet und Kleinlasthärte- und Porositätsmessungen an diesen vorgenommen. In Abbildung 7.3 sind die lichtmikroskopischen Aufnahmen der Schlitze dargestellt. Abbildung 7.4 zeigt die Ergebnisse der Härte- und Porositätsmessungen. An den metallographischen Schlitten lässt sich erkennen, dass bei beiden modifizierten Bahnstrategien die Beschichtung eine hohe Schichtqualität mit einer guten Anbindung an das Substrat aufweist. An den kritischen Innen- und Außenwinkeln zeigt sich ebenfalls keine Delamination der Beschichtung oder Risse durch eine übermäßige Verspannung der Beschichtung. Diese konstante Schichtqualität spiegelt sich auch in den Härte- und Porositätsmessungen wieder. Die Härte der Beschichtung liegt im Mittel bei $527 \pm 39 \text{ HV}_{0,3}$ und ist damit vergleichbar zu der Härte der WSC-Fe Beschichtung auf ebenen Substraten. Dies gilt auch für die Porosität mit knapp $4,9 \pm 1,2\%$. Signifikante Unterschiede der Härte und der Porosität auf den verschiedenen Bereichen der Bauteiloberfläche oder bei Einsatz verschiedener Bahnstrategien können nicht festgestellt werden. Obwohl Schwankungen zwischen den Messwerten auftreten, resultieren diese aber zum größten Teil aus dem inhomogenen und lamellaren Schichtgefüge der Beschichtung und wurden auch auf ebenen Proben beobachtet.

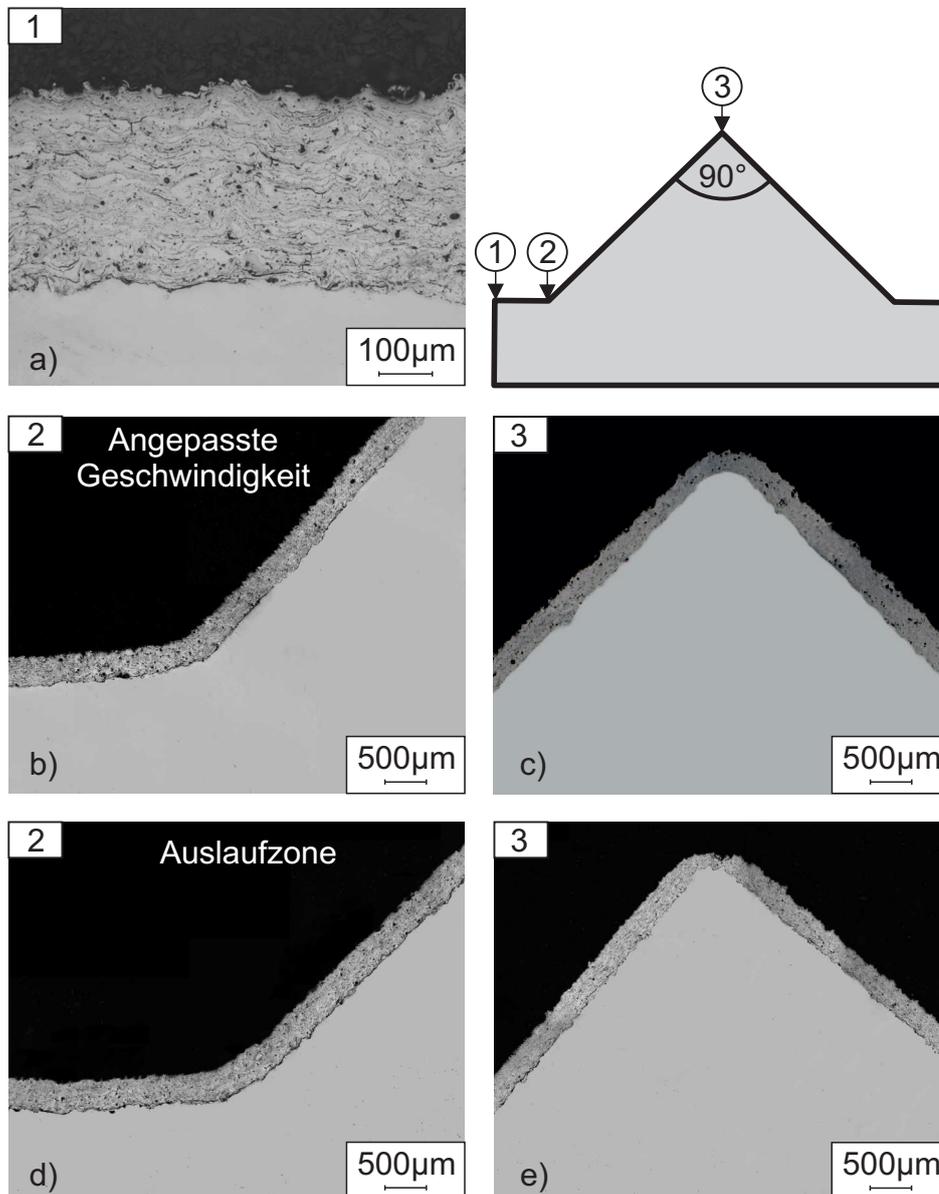
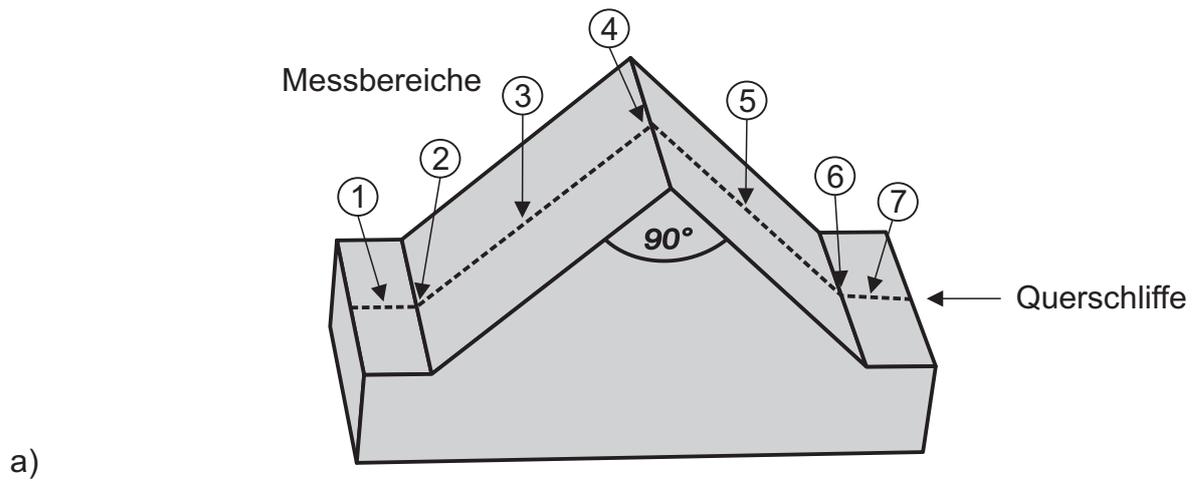
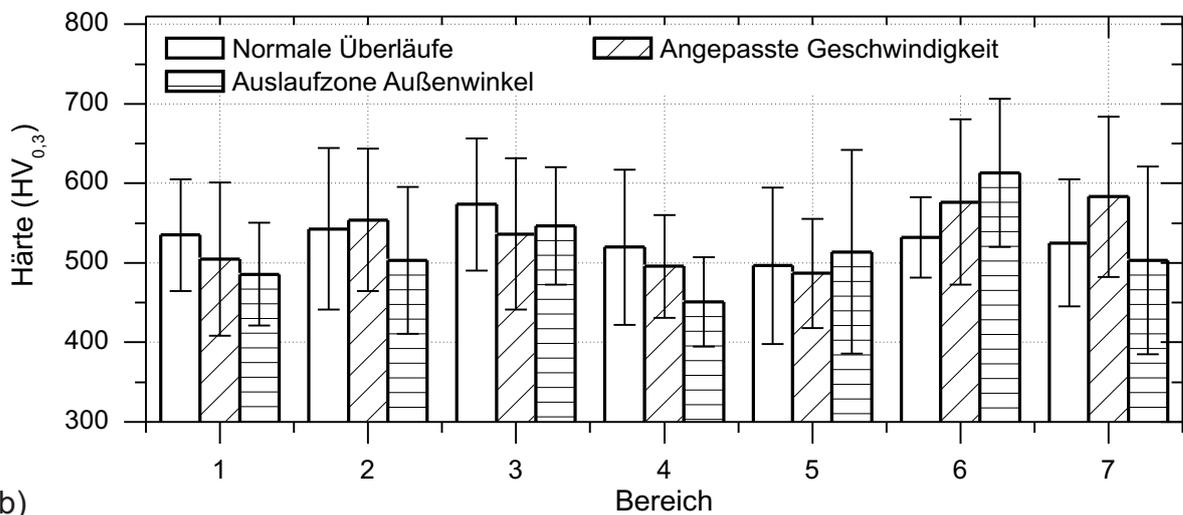


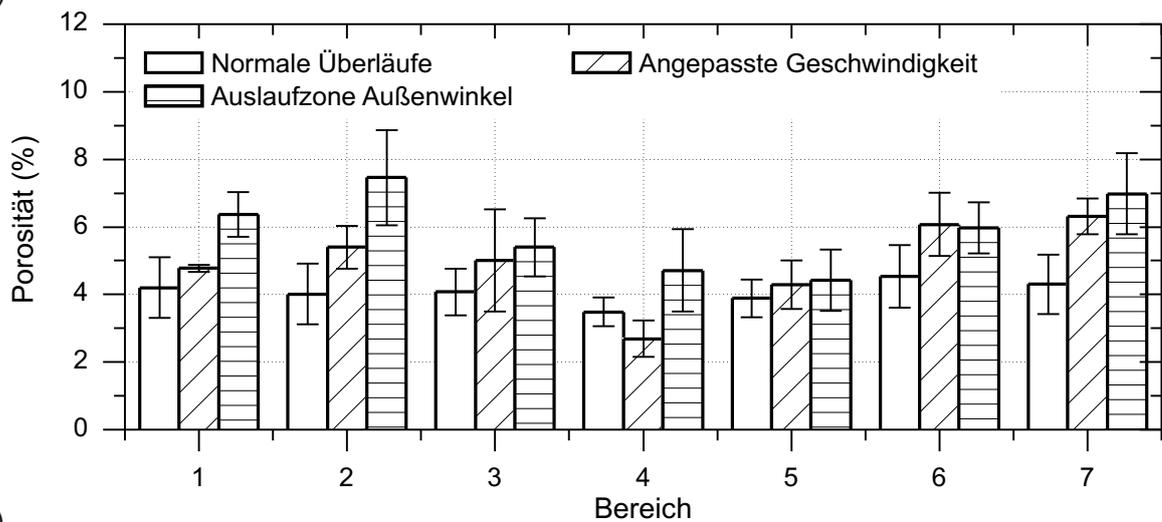
Abbildung 7.3: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten Bauteilen mit Außenwinkeln ($\gamma = 90^\circ$) nach Optimierung der Spritzbahn. a) Repräsentative Aufnahme der Seitenfläche (Bereich 1). Schichtdickenverlauf an dem Übergang in die Bauteilschräge (Bereich 2) (b, d) und an der Bauteilspitze (Bereich 3) (c, e)



a)



b)



c)

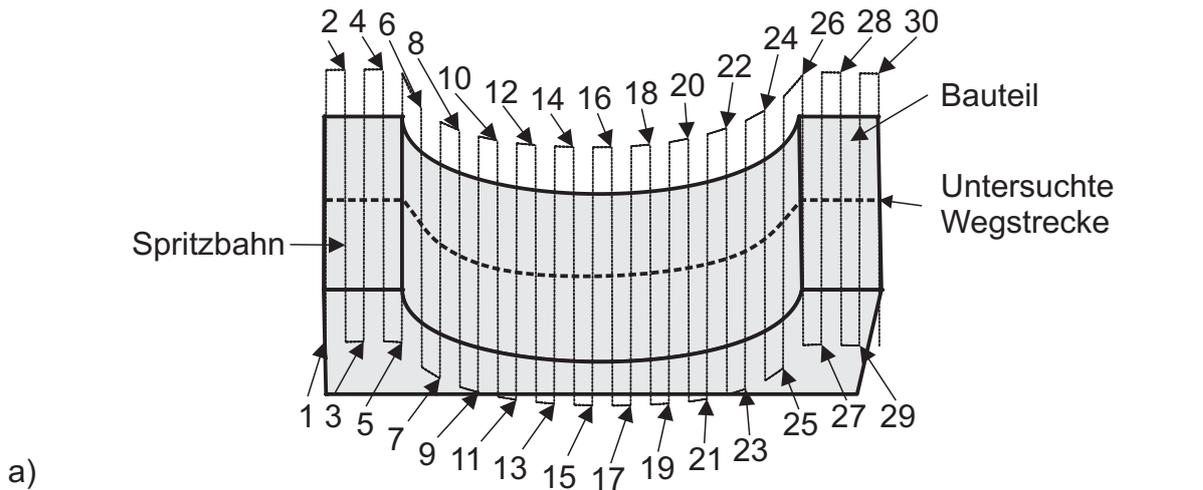
Abbildung 7.4: Vickershärte- und Porositätsmessungen an beschichteten Außenwinkeln 90°. a) Schematische Darstellung der Messbereiche, b) Kleinlasthärte $HV_{0,3}$, c) Porosität

7.1.2 Innenradius

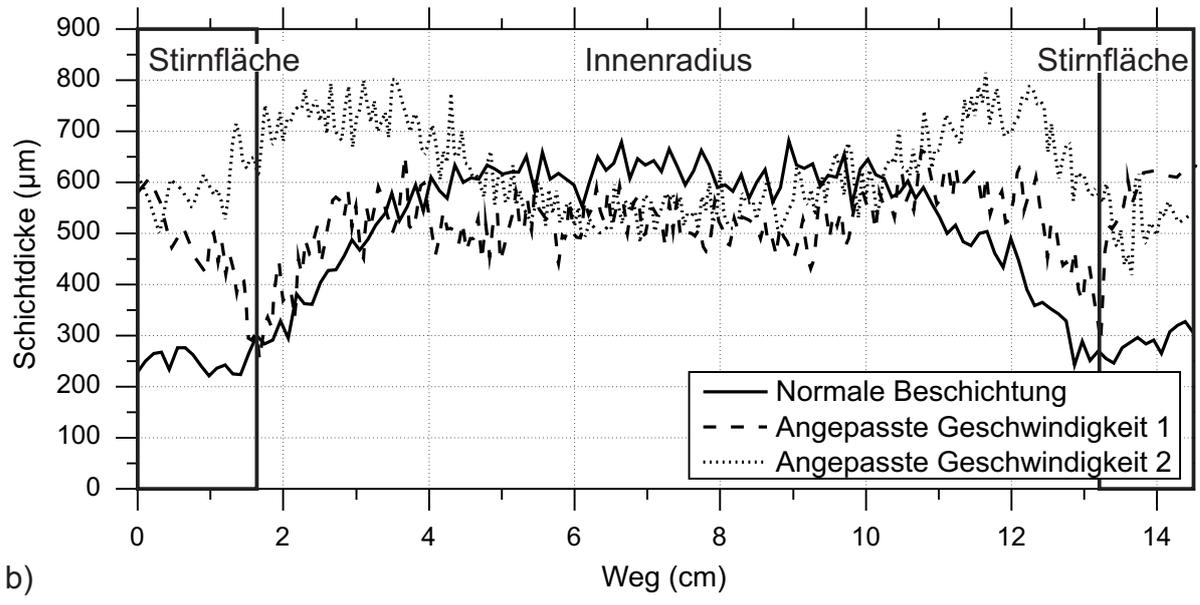
Eine Anpassung der Bahnstrategie an die Bauteiloberfläche wurde ebenfalls an einem Bauteil mit einem Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ durchgeführt. Dieses Bauteil wurde zur Schichtdickenoptimierung ausgewählt, da es bei Einsatz einer konventionellen Bahnstrategie starke Schwankungen der Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche zeigt und eine gleichmäßige Beschichtung nur mit einer umfangreichen Bahnplanung erzielt werden kann. Im Gegensatz zu einem kleineren Innenradius besteht allerdings eine realistische Chance eine gleichmäßige Schichtdicke auf der gesamten Bauteiloberfläche zu erzielen, da die Abmessungen des Bauteils in der Größenordnung der Abmessungen des Spritzstrahls liegen und somit eine sinnvolle Bahnplanung vorgenommen werden kann.

In Kapitel 6.6 konnte gezeigt werden, dass der Einsatz einer mäanderförmigen Spritzbahn in Kombination mit einer konstanten Verfahrensgeschwindigkeit bei der Beschichtung eines Bauteils mit einem Innenradius zu einer schwankenden Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche führt. Insbesondere auf der Stirnfläche des Bauteils bildet sich eine zu geringe Schichtdicke aus, während im Innenradius eine deutliche Überhöhung der Schichtdicke beobachtet wird. An dem Übergang zwischen diesen Bereichen zeigt sich dagegen ein keilförmiges Absinken der Schichtdicke (durchgezogene Linie in Abbildung 7.5). Diese Schwankungen der Schichtdicke über die Bauteiloberfläche haben verschiedene Ursachen.

Ein wesentlicher Einfluss auf die Schichtdicke an der Stirnfläche liegt darin begründet, dass sich an dem Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius keine Auslaufzone für den Lichtbogenspritzprozess befindet. Diese wäre allerdings nötig gewesen, um eine gleichmäßige Schichtdicke auf der Stirnfläche zu erzielen (vgl. Kapitel 7.1.1). Durch die fehlende Auslaufzone akkumuliert sich in diesem Bereich nur ein Teil der benötigten Spritzprofile zu der Spritzschicht und als Folge dessen liegt die Schichtdicke auf der Stirnfläche weit unterhalb der nach Gleichung 6.12 erwarteten Schichtdicke von knapp $400 \mu\text{m}$. Auf der Seite des Innenradius kann allerdings keine Auslaufzone genutzt werden, da hier eine Auslaufzone zu einer unerwünschten Beschichtung des Innenradius und damit zu einer Überhöhung der Schichtdicke in diesem Bereich führen würde. Verursacht wird dies durch den relativ großen Öffnungswinkel des Lichtbogenspritzstrahls ($11,8^\circ$). Dieser bewirkt, dass bei einer Annäherung der Spritzpistole an den Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius ein Teil des Innenradius durch Overspray mitbeschichtet wird. Dadurch überhöht sich die Schicht im Bereich des unteren Scheitelpunktes des Innenradius. An der Flanke des Innenradius hat der



a)



b)

Mäanderbahnen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Normale Beschichtung [mm/s]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Angepasste Geschwindigkeit 1 [mm/s]	110	90	70	100	130	160	200	200	200	200	190	180	170	160	150
	150	160	170	180	190	200	200	200	200	160	130	100	70	90	110
Angepasste Geschwindigkeit 2 [mm/s]	150	100	80	50	100	160	270	270	200	200	190	180	170	160	150
	150	160	170	180	190	200	200	270	270	160	100	50	80	100	150

c)

Abbildung 7.5: Optimierung eines regelgeometrischen Bauteils mit einem Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ durch Variation der Verfahrensgeschwindigkeit. Darstellung der a) angepassten Bahnstrategie, b) der gemessenen Schichtdicke und c) der eingesetzten Verfahrensgeschwindigkeiten

Overspray hingegen ein keilförmiges Absinken der Schichtdicke zur Folge. Verursacht wird dies dadurch, dass der Winkel zwischen den Spritzpartikeln des Oversprays und der Bauteiloberfläche um so spitzer wird, je näher der Spritzstrahl an den Übergang zwischen der Stirnfläche und den Innenradius gelangt. Folglich prallen am Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius vermehrt Spritzteilchen von der Bauteiloberfläche zurück und die Schichtdicke fällt keilförmig ab. Dieser Effekt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass für die Beschichtung der Flanken im Innenradius Spritzwinkel $\alpha < 90^\circ$ verwendet wurden. Eine Verringerung des Spritzwinkels an dieser Stelle sollte verhindern, dass bei einem Beschichtungsvorgang die gegenüberliegende Seite des Bauteils mitbeschichtet wird (vgl. Kapitel 6.6). Allerdings hat solch eine Modifikation den unerwünschten Nebeneffekt, dass bei Spritzwinkeln $\alpha < 90^\circ$ ein Absinken der Schichtdicke auftritt.

Zur Erzielung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf der gesamten Bauteiloberfläche wurde eine gezielte Anpassung der Bahnstrategie vorgenommen. Aus denen eingangs in diesem Kapitel vorgestellten Gründen wurde die Anpassung der Bahnstrategie mittels einer Variation der Verfahrensgeschwindigkeit durchgeführt. Im Rahmen der dazu notwendigen Versuche zeigte sich, dass das Bauteil in die zwei Teilbereiche „Innenradius“ und „Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius“ unterteilt werden kann. Auf beiden Bereichen lassen sich einzeln, recht unkompliziert, gleichmäßige Schichtdicken erzielen. Auf dem Innenradius muss dazu die Verfahrensgeschwindigkeit mit zunehmender Annäherung an den unteren Scheitelpunkt erhöht werden. Die korrekte Verfahrensgeschwindigkeit kann dabei durch die Gleichung 7.1 abgeschätzt werden. Auf dem Übergang zwischen der Stirnfläche und dem Innenradius kann dagegen die gleiche Strategie wie in Kapitel 7.1.1 verwendet werden, um eine gleichmäßige Schichtdicke zu erhalten. Der Übergang ist hierbei vergleichbar einem Außenwinkel von $\gamma = 90^\circ$.

Die Kombination beider Bereiche in einem Bauteil stellt allerdings eine hohe Herausforderung an die endkonturnahe Beschichtung dar. Problematisch ist hierbei, dass bei der Beschichtung des Übergangs zwischen Stirnfläche und Innenradius, wie im Vorhinein beschrieben, eine unerwünschte Mitbeschichtung des Innenradius stattfindet. Dies muss bei der Anpassung der Bahnstrategie berücksichtigt werden. Wird die Verfahrensgeschwindigkeit an dem Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius abgesenkt, so ist es notwendig, parallel die Verfahrensgeschwindigkeit auf dem Innenradius zu erhöhen. Zudem kann auf der Stirnfläche keine Auslaufzone in Richtung des Innenwinkels genutzt werden, da sie eine starke Überhöhung der Schichtdicke im Innenradius zur Folge hätte.

Allerdings lässt sich selbst durch eine an die beiden Teilbereiche angepasste Verfahrensgeschwindigkeit keine gleichmäßige Schichtdicke auf der gesamten Bauteiloberfläche erzielen. Ähnlich wie bei dem Außenwinkel $\gamma = 90^\circ$, fällt auch hier nach einer Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit die Schichtdicke an dem Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius ab (gestrichelte Linie in Abbildung 7.5). Der Abfall der Schichtdicke ist in diesem Fall jedoch stärker ausgeprägt als an dem Außenwinkel $\gamma = 90^\circ$, da an dem Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius Spritzwinkel $\alpha < 90^\circ$ verwendet wurden (vgl. Kapitel 6.6). Dies hat zur Folge, dass vermehrt Spritzpartikel von der Bauteiloberfläche zurückprallen und dadurch die Schichtdicke stärker absinkt.

Eine Kompensation des Schichtdickenabfalls am Übergang zwischen der Stirnfläche und dem Innenradius lässt sich durch ein weiteres Absenken der Verfahrensgeschwindigkeit erreichen. Als Resultat stellt sich auf der gesamten Bauteiloberfläche eine Mindestschichtdicke von $500 \mu\text{m}$ ein. Der große Öffnungswinkel des Spritzstrahls hat allerdings zur Folge, dass an den äußeren Flanken des Innenradius eine starke Überhöhung der Schichtdicke stattfindet (gepunktete Linie in Abbildung 7.5). Diese Maßnahme ist daher nur sinnvoll, wenn eine Nachbearbeitung der Bauteiloberfläche vorgesehen ist.

Ein besseres Ergebnis lässt sich erreichen, wenn parallel zu der Veränderung der Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzwinkel auf der Stirnfläche abgesenkt wird (Mäanderbahnen 1-5 und 26-30 in Abbildung 7.6). Dabei wird die Spritzpistole auf $\alpha = 60^\circ$ verkippt, so dass sie von dem Innenradius wegzeigt. Dem geht die Überlegung voraus, dass durch eine Verkipfung der Spritzpistole weniger Spritzteilchen im Innenradius auftreffen und dadurch der Overspray minimiert werden kann. In Abbildung 7.6b lässt sich erkennen, dass diese Vorgehensweise zu einer gleichmäßigeren Schichtdicke an dem Übergang zwischen Stirnfläche und Innenradius führt.

Für eine weitere Verbesserung des Schichtdickenverlaufs wurde ein Versuch durchgeführt, in dem neben der Verfahrensgeschwindigkeit und dem Spritzwinkel der Spritzabstand ebenfalls auf $S = 80 \text{ mm}$ abgesenkt wurde. Das sollte bewirken, dass in einem Beschichtungsvorgang eine kleinere Fläche beschichtet wird (vgl. Kapitel 6.2) und folglich weniger Overspray in den Innenradius gelangt. In Abbildung 7.6c lässt sich erkennen, dass eine Verringerung des Spritzabstandes eine Überhöhung der Beschichtung in einem engeren Bereich zur Folge hat. Das bewirkt zwar keine deutliche Verbesserung der Endkonturnähe, jedoch wird hierdurch eine eventuelle Nachbearbeitung auf einen kleineren Bereich eingeschränkt.

Der Einfluss der beiden Bahnstrategien, bei denen die Verfahrensgeschwindigkeit angepasst wurde, auf die mikrostrukturellen und morphologischen Schichteigenschaften wurde anhand von lichtmikroskopischen Aufnahmen an metallographischen Schlif-

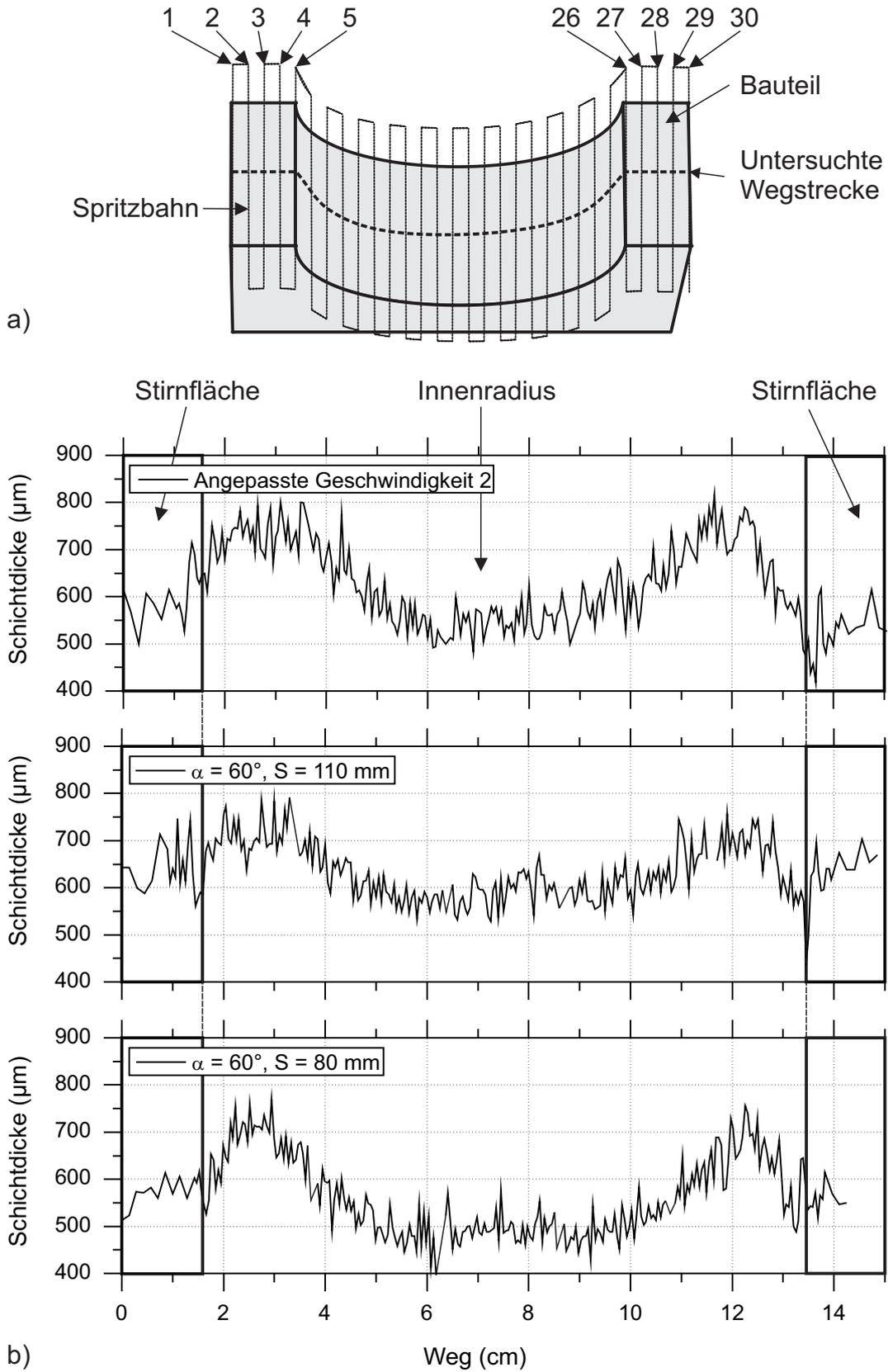


Abbildung 7.6: Einfluss des Spritzwinkels und des Spritzabstandes auf die Schichtdicke im Übergang der Stirnfläche in den Innenradius. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahnen auf denen Spritzwinkel und Spritzabstand variiert wurden, b) gemessene Schichtdicken

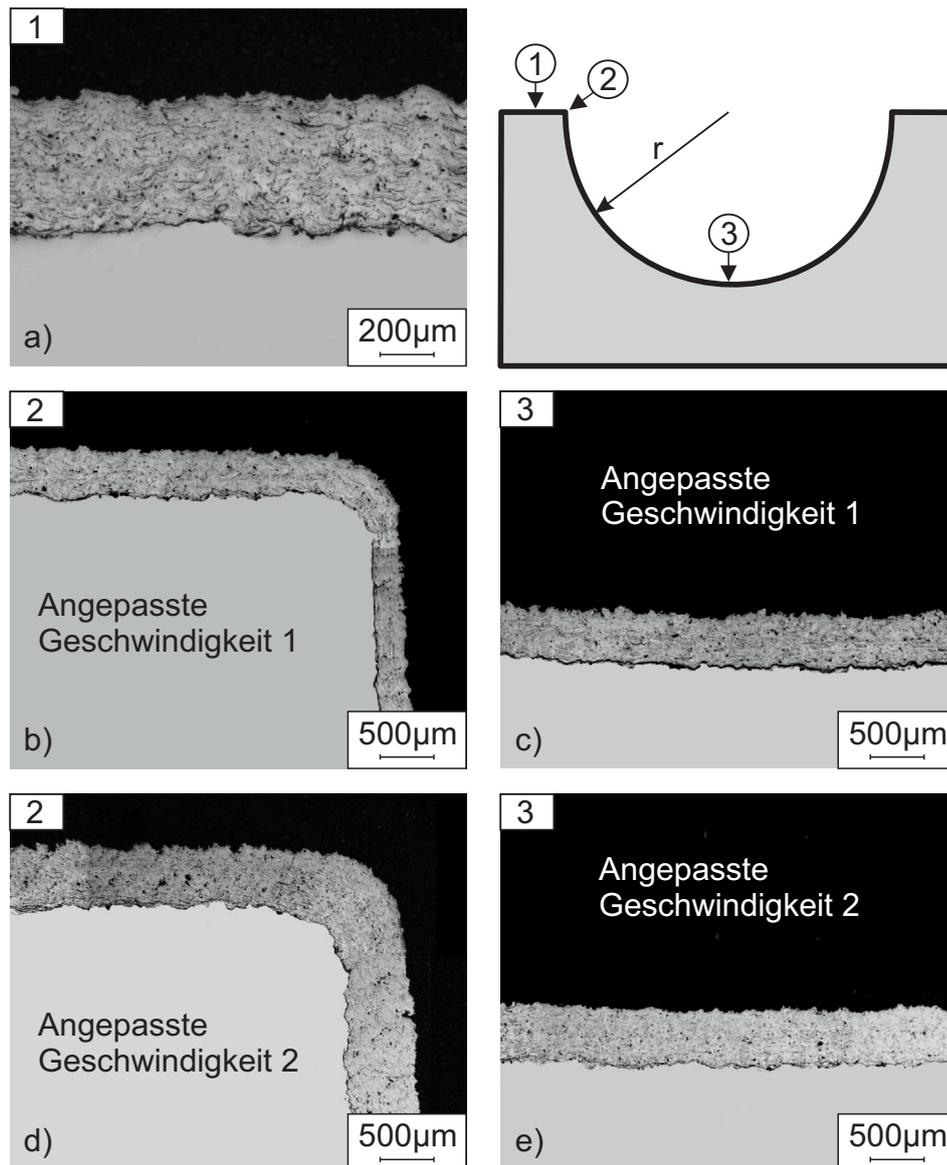
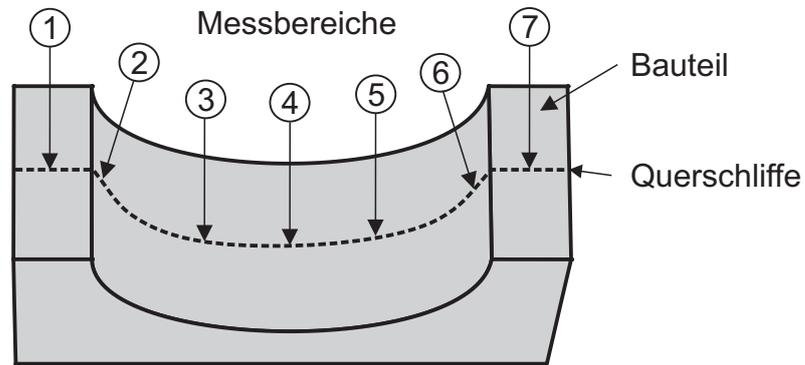
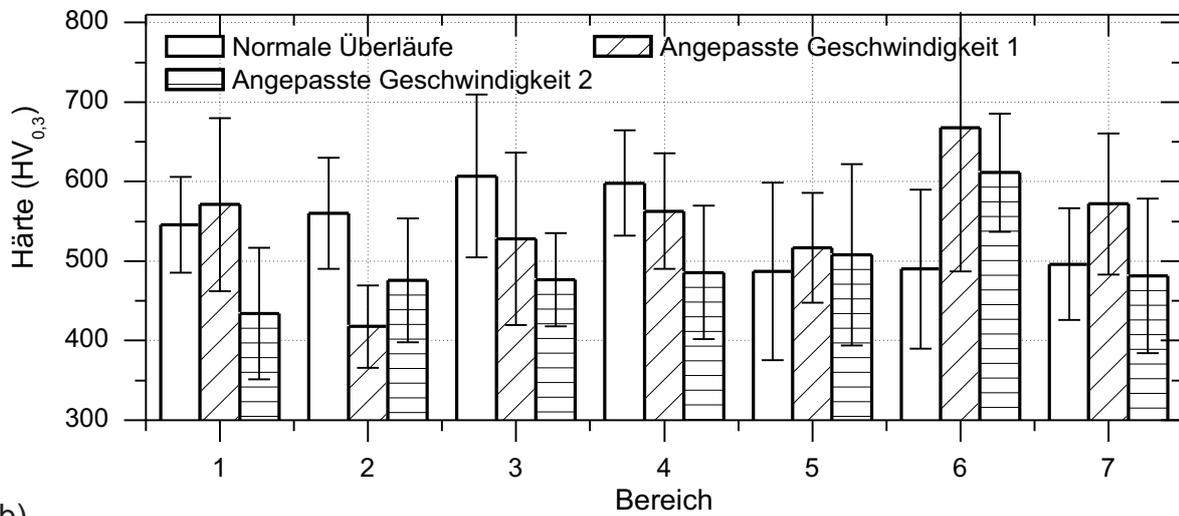


Abbildung 7.7: Lichtmikroskopische Aufnahmen an Innenradien $r = 40 \text{ mm}$, die mit einer angepassten Geschwindigkeit gemäß Abbildung 7.5c beschichtet wurden

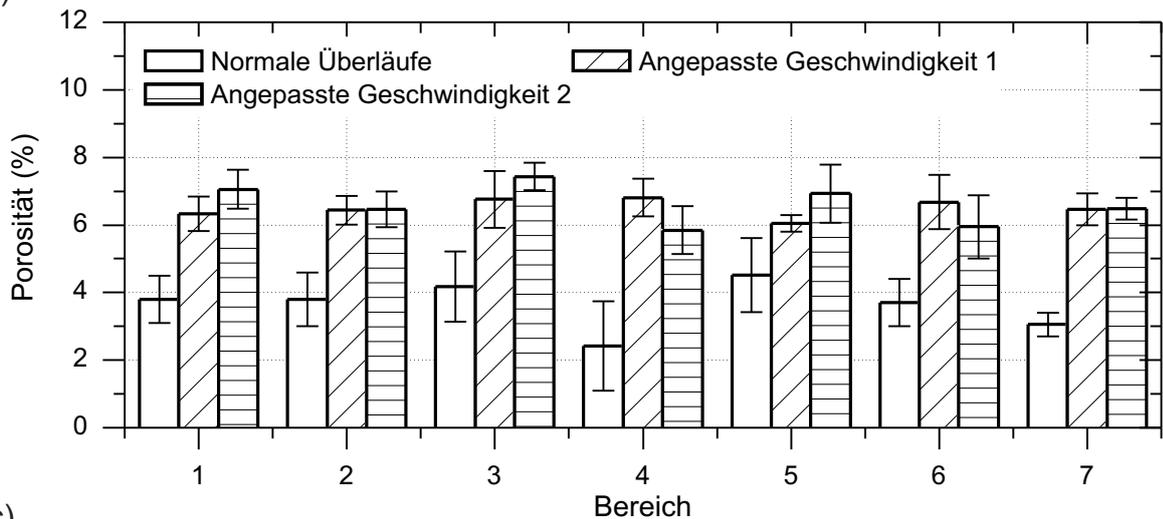
fen begutachtet und ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Das Resultat beider Bahnstrategien sind dichte Schichten mit einer guten Anbindung zum Substrat, die weder Schichtdelaminationen noch ausgeprägte Spannungsrisse aufweisen. Darüberhinaus können keine signifikanten Änderungen der Schichtqualität auf der Bauteiloberfläche beobachtet werden. Die Morphologie der Beschichtungen ist damit vergleichbar einer Spritzschicht, die mit einer konventionellen Bahnstrategie ($V = 200 \text{ mm/s}$) beschichtet wurde. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den Härte- und Porositätsmessungen wieder (Abbildung 7.8). Die Schichten weisen im Mittel eine Härte von $528 \pm 63 \text{ HV}_{0,3}$ und eine Porosität von $5,6 \pm 1,5\%$ auf. Genau wie bei den Bauteilen mit Außenwinkeln treten Schwankungen der Härte und der Porosität auf der Bauteiloberfläche auf,



a)



b)



c)

Abbildung 7.8: Vickershärte- und Porositätsmessungen an beschichteten Innenradien $r = 40 \text{ mm}$. a) Schematische Darstellung der Messbereiche, b) Kleinlasthärte $HV_{0,3}$, c) Porosität

die aber hauptsächlich auf das inhomogene und stark lamellare Gefüge der lichtbogen-gespritzten Schichten zurückgeführt werden können und ebenfalls auf ebenen Substraten beobachtet wurden. Auffällig ist jedoch, dass die normale Bahnstrategie auf der gesamten Bauteiloberfläche zu einer geringfügig niedrigeren Porosität als beide angepassten Bahnstrategien führt.

7.2 Umformwerkzeug

Die in den vorherigen Kapiteln ermittelten Ergebnisse zur Beschichtung komplexer Geometrien wurden in diesem Abschnitt angewendet, um ein reales Bauteil endkonturnah zu beschichten. Zum Einsatz kam hierbei ein Demonstratorbauteil aus dem Sonderforschungsbereich (SFB) 708 [Til07, Til09, Til10]. Im SFB 708 wird ein neuer fertigungstechnischer Ansatz verfolgt, um Werkzeugsysteme für die Blechteilefertigung in der Automobilindustrie durch Verfahren der Oberflächentechnik, wie das Zerspanen und das Thermische Spritzen, zu veredeln und an das vorherrschende Belastungsprofil anzupassen. Die Grundlage für dieses Forschungsvorhaben bildet die Erkenntnis, dass klassisch gefertigte Werkzeugsysteme für die Blechteilefertigung nicht mehr den aktuellen Ansprüchen in der Umformtechnik genügen, da heutzutage, insbesondere im Automobilbau, vermehrt hochfeste Blechwerkstoffe wie beispielsweise TRIP-(Transformation Induced Plasticity) oder TWIP-(Twinning Induced Plasticity)-Stähle eingesetzt werden [Nak94, HR02, KB04, Ger04, HHEI04, SFH⁺05, Pot05]. Derart hochfeste Blechwerkstoffe erfreuen sich einer immer größeren Beliebtheit in der Automobilindustrie, da sie auch bei sehr geringen Wandstärken eine ausreichende Crashesicherheit bieten und damit einen aktiven Beitrag zur Gewichtsreduzierung im Automobil liefern.

Bei der Umformung hochfester Stähle treten allerdings hohe Kräfte im Umformprozess auf, die zu einem erhöhten Verschleiß auf der Werkzeugoberfläche führen. Um dem entgegenzuwirken wird im SFB 708 ein neuartiges Konzept entwickelt, um Werkzeugoberflächen mit hochverschleißfesten thermischen Spritzschichten zu beschichten. Die große Herausforderung an den Thermischen Spritzprozess liegt hierbei darin, dass die Werkzeuge mit einer hohen Konturgenauigkeit beschichtet werden müssen. Bereits geringe Abweichungen der Werkzeugoberfläche von wenigen Mikrometern von der Sollgeometrie bewirken eine ungleichmäßige Belastung des Werkzeuges im Einsatz und verursachen dadurch eine unerwünschte Verformung des Bleches. Zudem sollten Nachbehandlungsverfahren zur Anpassung der Schichtdicke soweit möglich

auf ein Minimum reduziert werden, da sie die Kosten für die Herstellung eines Umformwerkzeuges in die Höhe treiben und insbesondere bei Verschleißschichten nicht wirtschaftlich durchgeführt werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Konzepte entwickelt, um das Demonstratorbauteil endkonturnah zu beschichten. Als Demonstrator wurde im SFB 708 ein Umformwerkzeug zur Herstellung einer B-Säule für den Automobilbau verwendet. Dieses Umformwerkzeug ist aus den drei wesentlichen Baugruppen für die Blechumformung, dem Stempel, dem Niederhalter und der Matrize, aufgebaut. Die Entwicklung geeigneter Bahnstrategien für die endkonturnahe Beschichtung wurde anhand der Matrize durchgeführt, da diese eine geometrisch komplexe, freigeformte Oberfläche aufweist und daher eine hohe Anforderung an die Bahnplanung darstellt. Abbildung 7.9 zeigt eine Prinzipskizze der Matrize¹. Die Matrize lässt sich in zwei wesentliche Teilbereiche für die Beschichtung aufteilen. Die Stirnfläche der Matrize ist eben und kann daher mit einer konventionellen Bahnstrategie beschichtet werden. Im inneren Bereich weist die Matrize hingegen einen Radius von $r = 10 \text{ mm}$ sowie zwei Wendestellen und zwei Kreissegmente auf dem Radius auf. Um hier eine gleichmäßige Schichtdicke zu erzielen, muss die Bahnstrategie deshalb an die Bauteiloberfläche angepasst werden.

Für eine einfachere Anpassung der Bahnstrategie an die Bauteiloberfläche wurde das Umformwerkzeug in mehrere Segmente aufgeteilt. Die Optimierung der Bahnstrategie wurde dabei an einem zentralen Segment durchgeführt (vgl. markierter Bereich in Abbildung 7.9). Dieses Segment weist neben dem Außenradius auch eine Wendestelle auf und ist daher ein anspruchsvolles Bauteil für die Schichtoptimierung. Die hierbei erlangten Erkenntnisse können im Nachhinein recht einfach auf die anderen Matrizensegmente übertragen werden, da diese entweder baugleich und spiegelverkehrt oder geometrisch einfacher gestaltet sind. Lediglich der Übertrag auf die Rundbögen stellt eine gewisse Herausforderung dar, da an diesen Stellen die Gefahr besteht, dass aufgrund der starken Richtungsänderungen der Bauteilnormalen, der Beschichtungsroboter nicht die geforderte Bahngeschwindigkeit umsetzen kann und daher teilweise mit zu geringen Geschwindigkeiten beschichtet wird (vgl. Kapitel 6.7). Dieser Sachverhalt wurde allerdings in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung der Technischen Universität Dortmund überprüft und konnte nicht bestätigt werden.

Zur Vorbereitung auf die Beschichtung der Umformwerkzeugmatrize wurden Vorar-

¹Das Umformwerkzeug wurde am Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Technischen Universität Dortmund konstruiert und gebaut. Die Prinzipskizze basiert auf der technischen Zeichnung des Umformwerkzeuges.

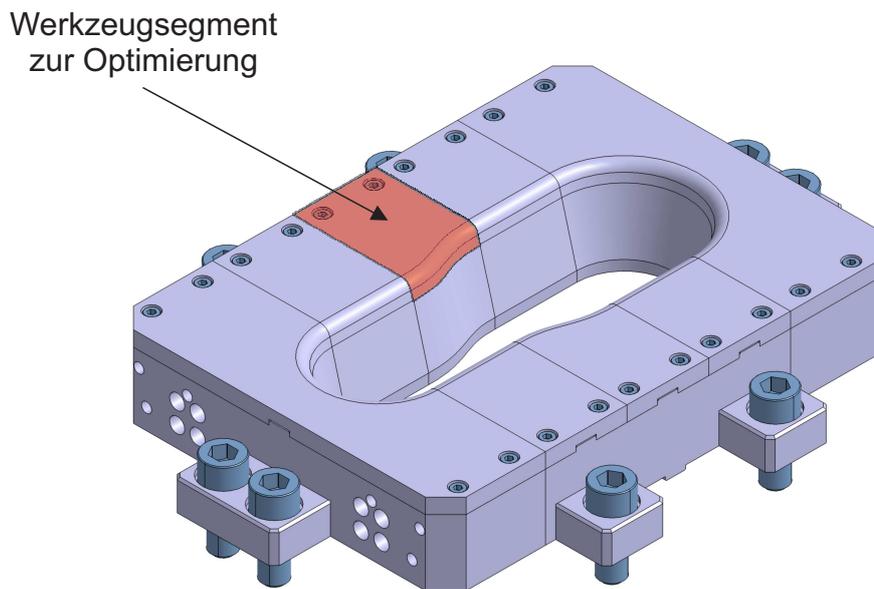


Abbildung 7.9: Prinzipskizze der zu beschichtenden Umformwerkzeugmatrize

beiten an Bauteilen mit verschiedenen Außenradien durchgeführt. Diese wurden mit den optimierten Spritzparametern und unter Einsatz einer konventionellen Bahnstrategie beschichtet. Dabei zeigte sich, dass die thermischen Spritzschichten auf Außenradien ein ähnliches Verhalten wie die Spritzschichten auf Außenwinkeln aufweisen. Genau wie bei Außenwinkeln tritt ein umso stärkerer Abfall der Schichtdicke auf, je kleiner der Außenradius/-winkel ist (Abbildung 7.10). Der höchste Schichtdickenabfall zeigte sich am Scheitelpunkt des Außenradius. Es konnte darüberhinaus ermittelt werden, dass die Differenz zwischen der minimalen und der maximalen Schichtdicke mit abnehmendem Bauteilradius annähernd linear ansteigt (Abbildung 7.10b). Dieser Zusammenhang lässt sich durch die empirisch ermittelte Gleichung

$$\Delta\text{Schichtdicke}(r) = -5,8 \cdot r + 260 \quad (7.2)$$

beschreiben, die mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,91$ einen Zusammenhang zwischen der Differenz der minimalen und der maximalen Schichtdicke $\Delta\text{Schichtdicke}$ [μm] und dem Bauteilradius r [mm] aufstellt.

Gemäß Gleichung 7.2 wird oberhalb eines Radius von $r \sim 45 \text{ mm}$ eine konstante Schichtdicke auf dem gesamten Radius prognostiziert. Unterhalb dessen steigt die Differenz zwischen der minimalen und der maximalen Schichtdicke mit abnehmendem

Radius an. Für das Matrizensegment bedeutet diese Erkenntnis, dass auf der Werkzeugoberfläche bei einem Radius $r = 10 \text{ mm}$ ein deutliches Absinken der Schichtdicken auftritt. Anhand der empirischen Formel wird hier ein Schichtdickenabfall von $200 \mu\text{m}$ vorausgesagt.

Ein derartiger Schichtdickenabfall konnte tatsächlich auf einem konventionell beschichteten Matrizensegment beobachtet werden (gepunktete Linie in Abbildung 7.11b). Genau wie prognostiziert, fällt die Schichtdicke am Scheitelpunkt des Außenradius am stärksten ab. Allerdings tritt hier mit knapp $250 \mu\text{m}$ ein höherer Schichtdickenabfall auf, als durch das Modell vorausgesagt wurde. Diese Abweichung lässt sich darauf zurückführen, dass auf dem Matrizensegment nur ein Abschnitt des Kreisbogens beschichtet wurde, während im Gegensatz dazu im Modellversuch ein Halbkreis gespritzt wurde. Dementsprechend geht auf dem Matrizensegment mehr Spritzgut durch Overspray verloren und es tritt ein stärkeres Absinken der Schichtdicke auf. Zur Kompensation des Schichtdickenabfalls auf dem Außenradius wurden verschiedene Beschichtungsstrategien ermittelt. So konnte durch ein gezieltes Hinzufügen zusätzlicher Überläufe auf dem Außenradius eine deutlich gleichmäßigere Schichtdickenverteilung auf der Bauteiloberfläche erreicht werden (gestrichpunktete Linie in Abbildung 7.11b). Hierfür wurden zwei zusätzliche Überläufe auf der Mäanderbahn 2 und der Mäanderbahn 4 (vgl. Abbildung 7.11a) zu der konventionellen Beschichtungsstrategie hinzugefügt. Auf der Mäanderbahn 4 wurde der zusätzliche Überlauf mit $V = 200 \text{ mm/s}$ ausgeführt, da in diesem Bereich die Schichtdicke verdoppelt werden sollte. Auf der Mäanderbahn 2 wurde hingegen eine Verfahrensgeschwindigkeit von $V = 440 \text{ mm/s}$ genutzt, da im unteren Bereich des Außenradius nur eine geringe Korrektur der Schichtdicke nötig war. Beim Einsatz dieser Beschichtungsstrategie zeigte sich allerdings, dass im Bereich der Wendestelle auf dem Radius eine Überhöhung der Schichtdicke stattfindet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Beschichtungsroboter an dieser Stelle nicht die hohe Verfahrensgeschwindigkeit der Mäanderbahn 2 konstant halten kann. Die tatsächliche Verfahrensgeschwindigkeit der Spritzpistole ist hier geringer und dementsprechend steigt die Schichtdicke an.

Eine Verbesserung des Beschichtungsergebnisses konnte auf dem Außenradius des Matrizensegments durch ein gezieltes Absenken der Verfahrensgeschwindigkeit erhalten werden. Dazu wurde auf der Mäanderbahn 4 die Verfahrensgeschwindigkeit nach der Gleichung 7.1 auf 100 mm/s verringert und gleichzeitig die Verfahrensgeschwindigkeiten auf den umliegenden Mäanderbahnen stückweise angepasst. Das erlaubte die Herstellung einer konstanten Schichtdicke auf der gesamten Bauteiloberfläche. Außerdem konnten bei dieser Bahnstrategie keine signifikanten Schwankungen der Schicht-

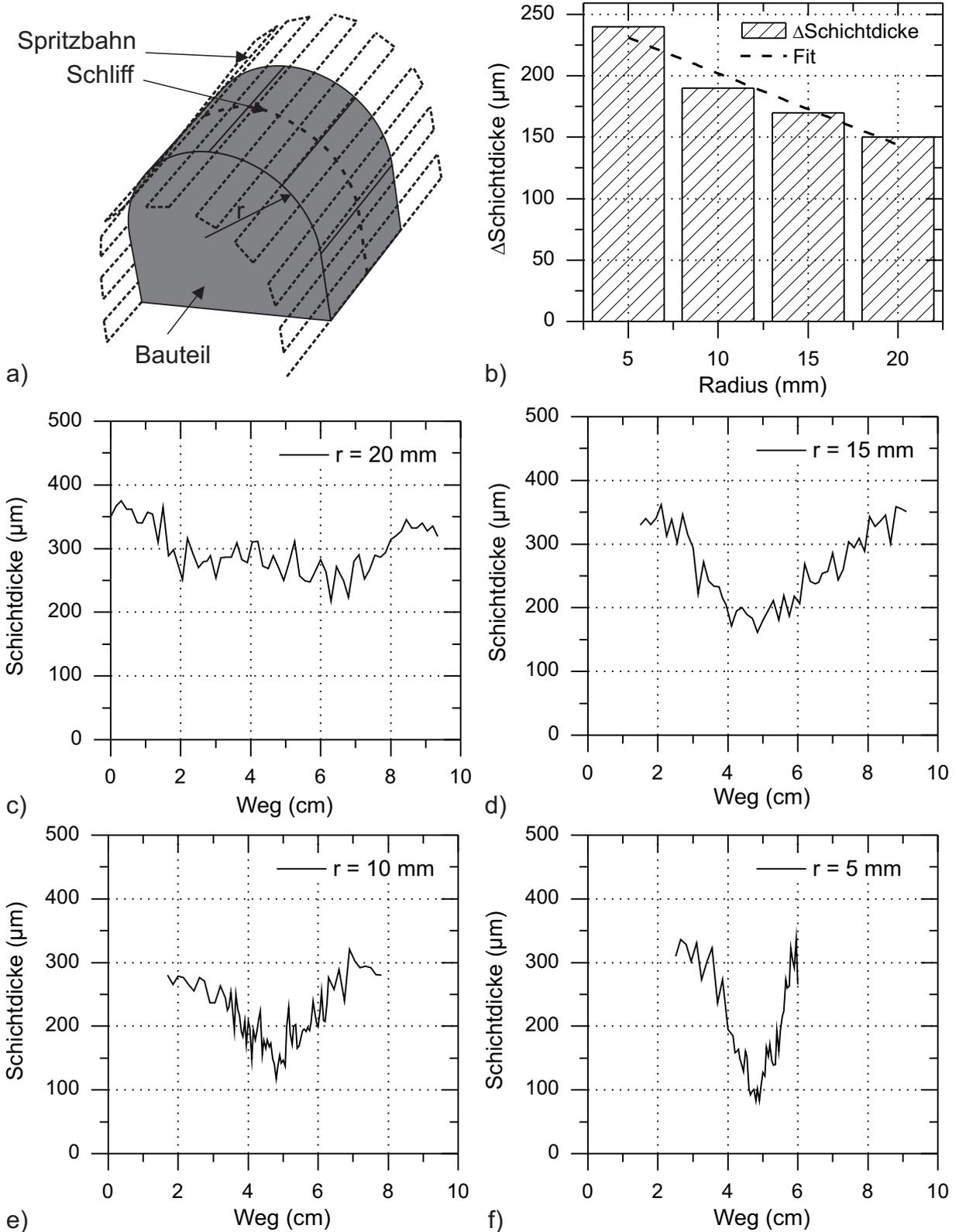


Abbildung 7.10: Beschichtung von Außenradien. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahn und des Messbereichs, b) Schichtdickendifferenz Δ Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche, c)-f) gemessene Schichtdickenprofile über die Bauteiloberfläche

dicke an der Wendestelle beobachtet werden, da durch das Absenken der Verfahrensgeschwindigkeit die Bahn- und Geschwindigkeitstreue des Beschichtungsroboters erhöht wurde.

Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf der Bauteiloberfläche bot sich durch eine Anpassung des Bahnabstandes an die Bauteilgeometrie. Dies wurde auf Grundlage der Ergebnisse der Geschwindigkeitsanpassung durchgeführt. Dazu wurde eine Vereinfachung der empirisch ermittelten Formeln für die Auftragsrate als Funktion des Bahnabstandes (Gleichung 6.10) und für die Auftragsrate als Funktion der Verfahrensgeschwindigkeit (Gleichung 6.12) vorgenommen. Im ersten Schritt wurde in beiden Gleichungen der Exponent des Bahnabstandes $(-0,97)$ bzw. der Verfahrensgeschwindigkeit $(-1,02)$ durch einen linearen Zusammenhang angenähert.

$$A(B) = 852,77 \cdot B^{-0,97} \sim \frac{852,77}{B}$$

$$A(V) = 45136,79 \cdot V^{-1,02} \sim \frac{45136,79}{V}$$

Danach wurden die Auftragsraten A_1, A_2 zu zwei Bahnabständen B_1, B_2 bzw. zu zwei Verfahrensgeschwindigkeiten V_1, V_2 dividiert (vgl. auch Kapitel 7.1.1).

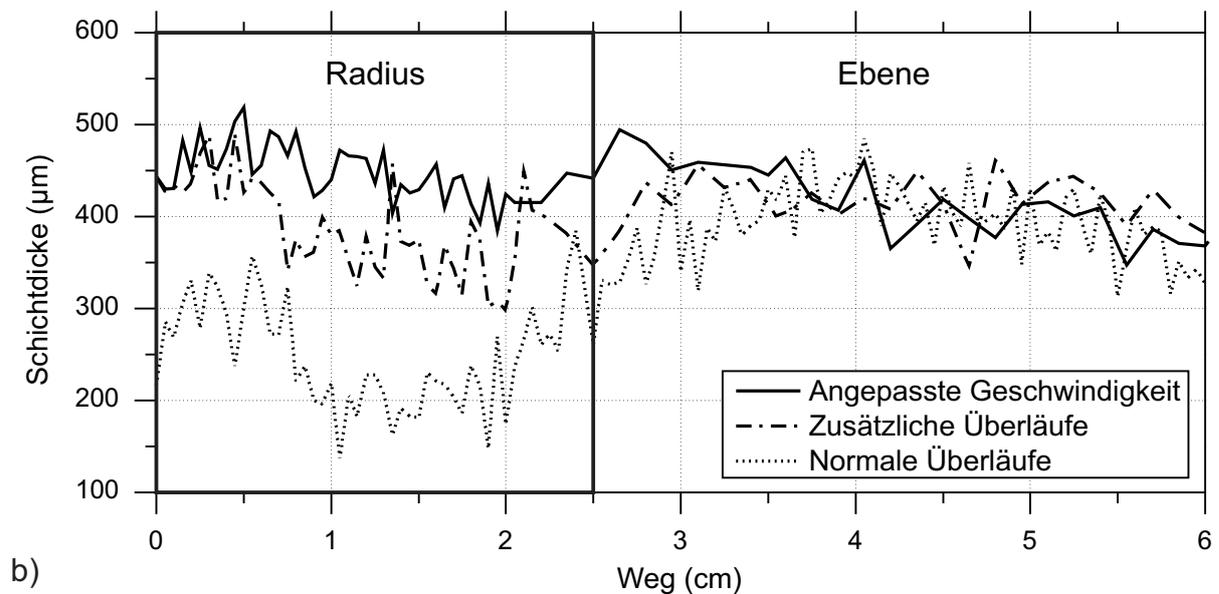
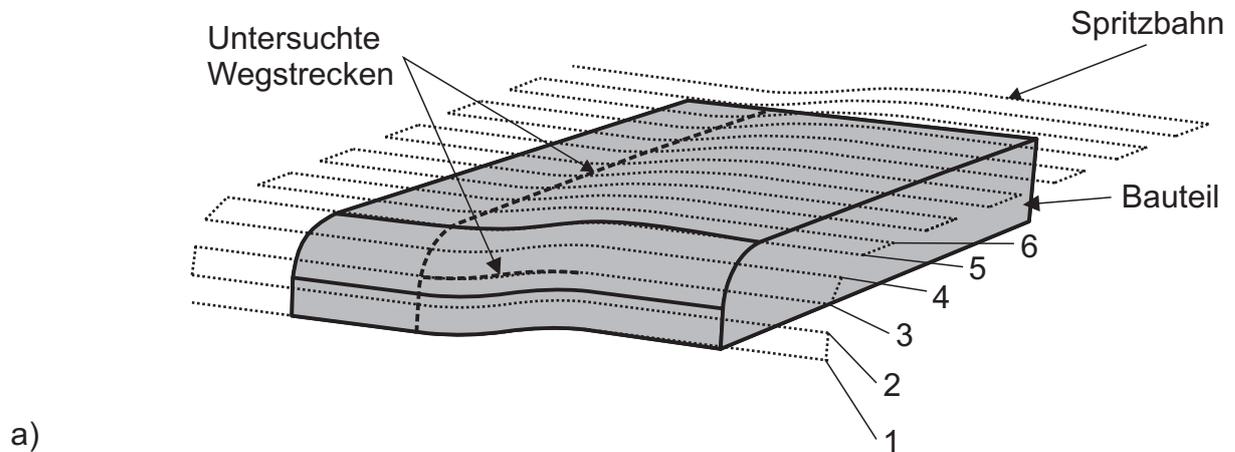
$$\Rightarrow \frac{A_1(B)}{A_2(B)} = \frac{B_2}{B_1}, \frac{A_1(V)}{A_2(V)} = \frac{V_2}{V_1}$$

Anschließend wurde die Annahme getroffen, dass das Verhältnis zweier Auftragsraten bei einer Variation des Bahnabstandes, dem Verhältnis zweier Auftragsraten bei einer Variation der Verfahrensgeschwindigkeit, entspricht. Aufgrund des ähnlichen hyperbolischen Verlaufs der Verfahrensgeschwindigkeit und des Bahnabstandes kann diese Näherung vorgenommen werden (vgl. Kapitel 6.3 und Kapitel 6.4). Damit lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen den Bahnabständen B_1, B_2 und den Verfahrensgeschwindigkeiten V_1, V_2 aufstellen und es ergibt sich eine Faustformel zur Umrechnung der Verfahrensgeschwindigkeit in den Bahnabstand.

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{V_2}{V_1} \tag{7.3}$$

Mit dieser Faustformel konnte der korrekte Bahnabstand zur Herstellung einer gleichmäßigen Beschichtung aus den angepassten Verfahrensgeschwindigkeiten berech-

Angepasste Geschwindigkeit/ Zusätzliche Überläufe



	[mm/s]	1	2	3	4	5	6	Rest
Normale Überläufe		200	200	200	200	200	200	200
Zusätzliche Überläufe		200	200	200	200	200	200	200
		-	440	-	200	-	-	-
Angepasste Geschwindigkeit		200	148	107	100	145	181	200

c)

Abbildung 7.11: Herstellung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf einem Umformwerkzeugsegment durch Anpassung der Spritzbahn. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahnen, b) gemessene Schichtdicken, c) Verfahrensgeschwindigkeiten auf den Mäanderbahnen

net werden. In Abbildung 7.12b ist der resultierende Schichtdickenverlauf als gepunktete Linie dargestellt. Deutlich lässt sich die hohe Endkonturnähe der Beschichtung erkennen. Allerdings zeigte sich in den Versuchen, dass eine Abänderung des Bahnabstandes nur aufwendig umsetzbar ist, da diese nur in Verbindung mit einer neuen Bahnplanung durchgeführt werden kann. Es sind daher in den meisten Fällen die im Vorhinein beschriebenen Strategien zur Herstellung einer gleichmäßigen Schichtdicke zu bevorzugen.

Zur Beurteilung der Schichtqualität wurden lichtmikroskopische Untersuchungen an metallographischen Schliffen der beschichteten Matrizensegmente durchgeführt (Abbildung 7.13). Diese zeigen, dass alle verwendeten Bahnstrategien zu dichten Schichten mit einer guten Anbindung an das Substrat führen. Ausgeprägte Schichtfehler wie Spannungsrisse oder Ausbrüche können nicht beobachtet werden. Außerdem treten keine deutlichen Änderungen in der Schichtqualität auf der Bauteiloberfläche auf. Dies wird auch anhand der Kleinlasthärte- und Porositätsmessungen bestätigt (Abbildung 7.14). Die Kleinlasthärte beträgt im Mittel $507 \pm 42 HV_{0,3}$, unabhängig von der verwendeten Bahnstrategie. Die Schichtporosität liegt im Mittel bei $6,1 \pm 1,2\%$. Im Gegensatz zu der Kleinlasthärtemessung lässt sich hier allerdings ein Unterschied zwischen der konventionellen und der angepassten Bahnstrategie beobachten. Die konventionelle Bahnstrategie führt auf der gesamten Bauteiloberfläche zu dichteren Schichten als die angepasste Bahnstrategie.

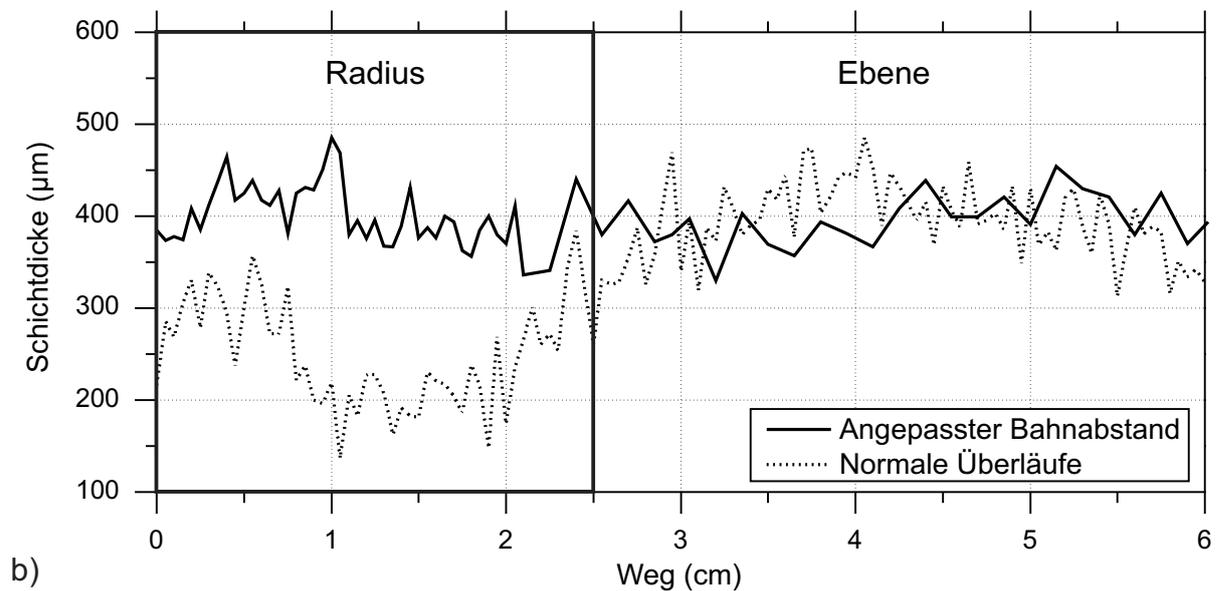
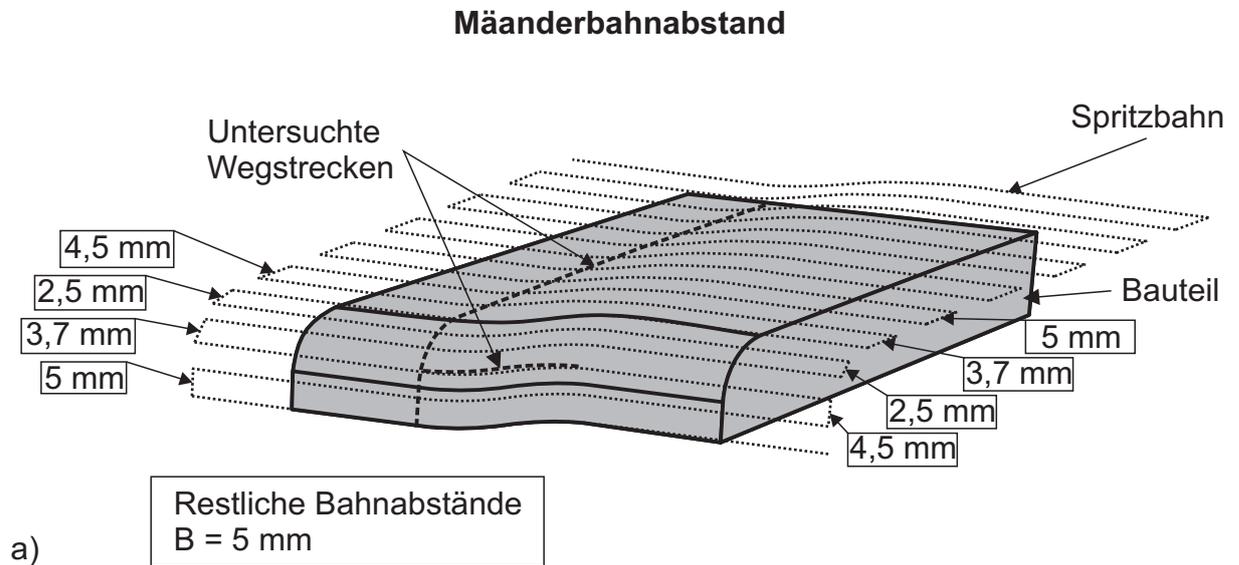


Abbildung 7.12: Herstellung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf einem Umformwerkzeugsegment durch Anpassung der Bahnabstände. a) Schematische Darstellung der Mäanderbahnen, b) gemessene Schichtdicken

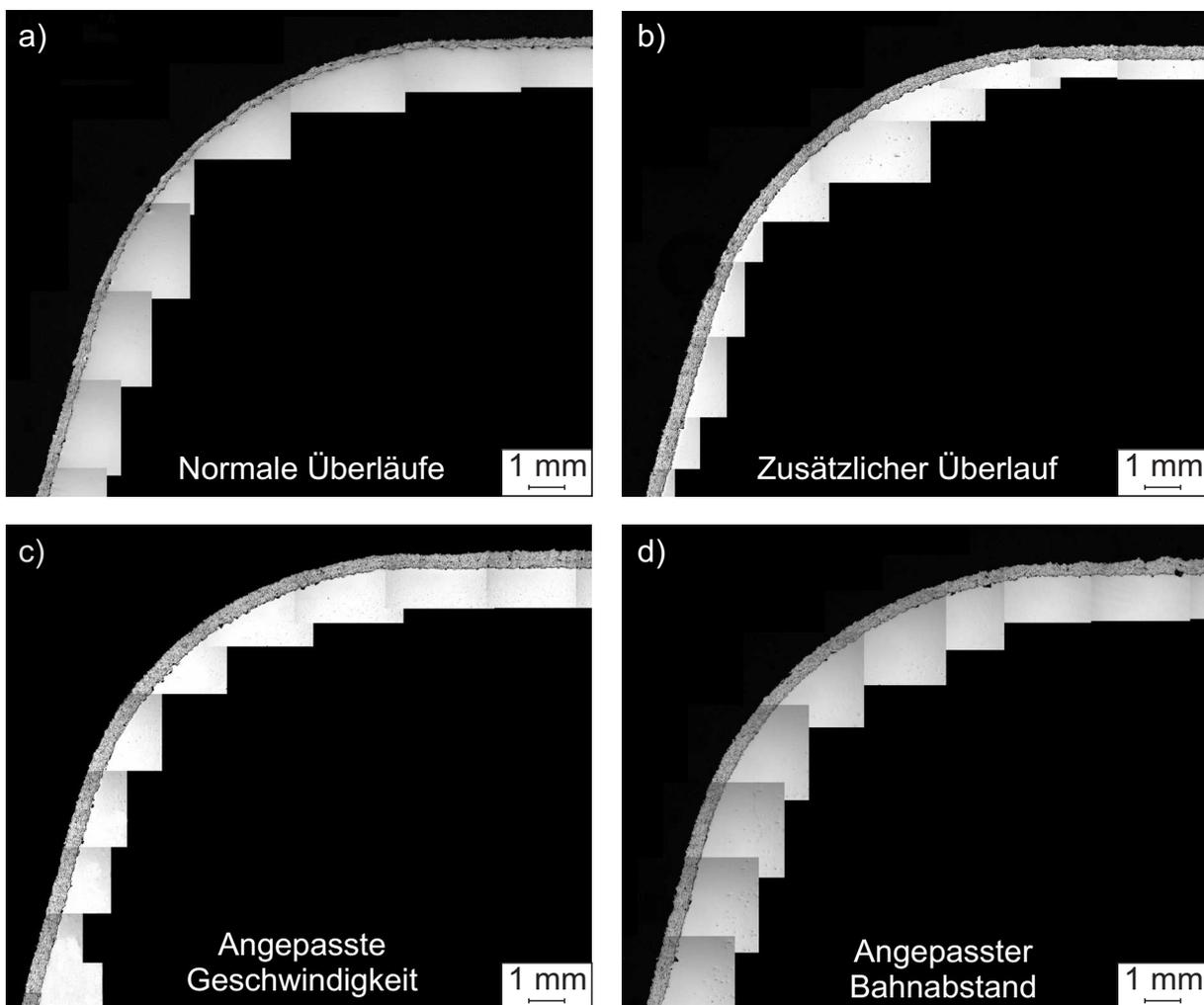
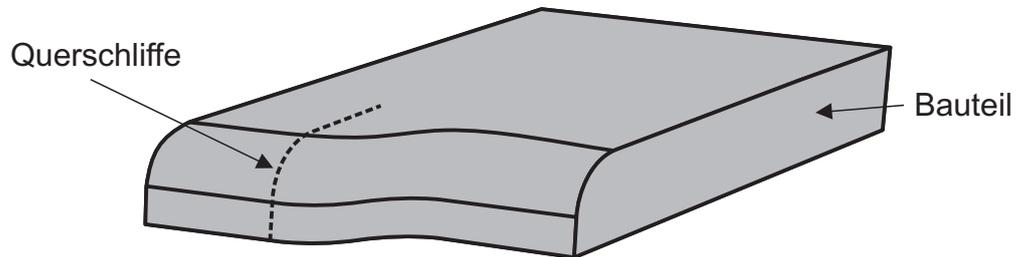


Abbildung 7.13: Lichtmikroskopische Aufnahmen von lichtbogengespritzten Umformwerkzeugsegmenten, die mit unterschiedlichen Bahnstrategien gespritzt wurden. a) Normale Überläufe, b) zusätzlicher Überlauf, c) angepasste Geschwindigkeit, d) angepasster Bahnabstand

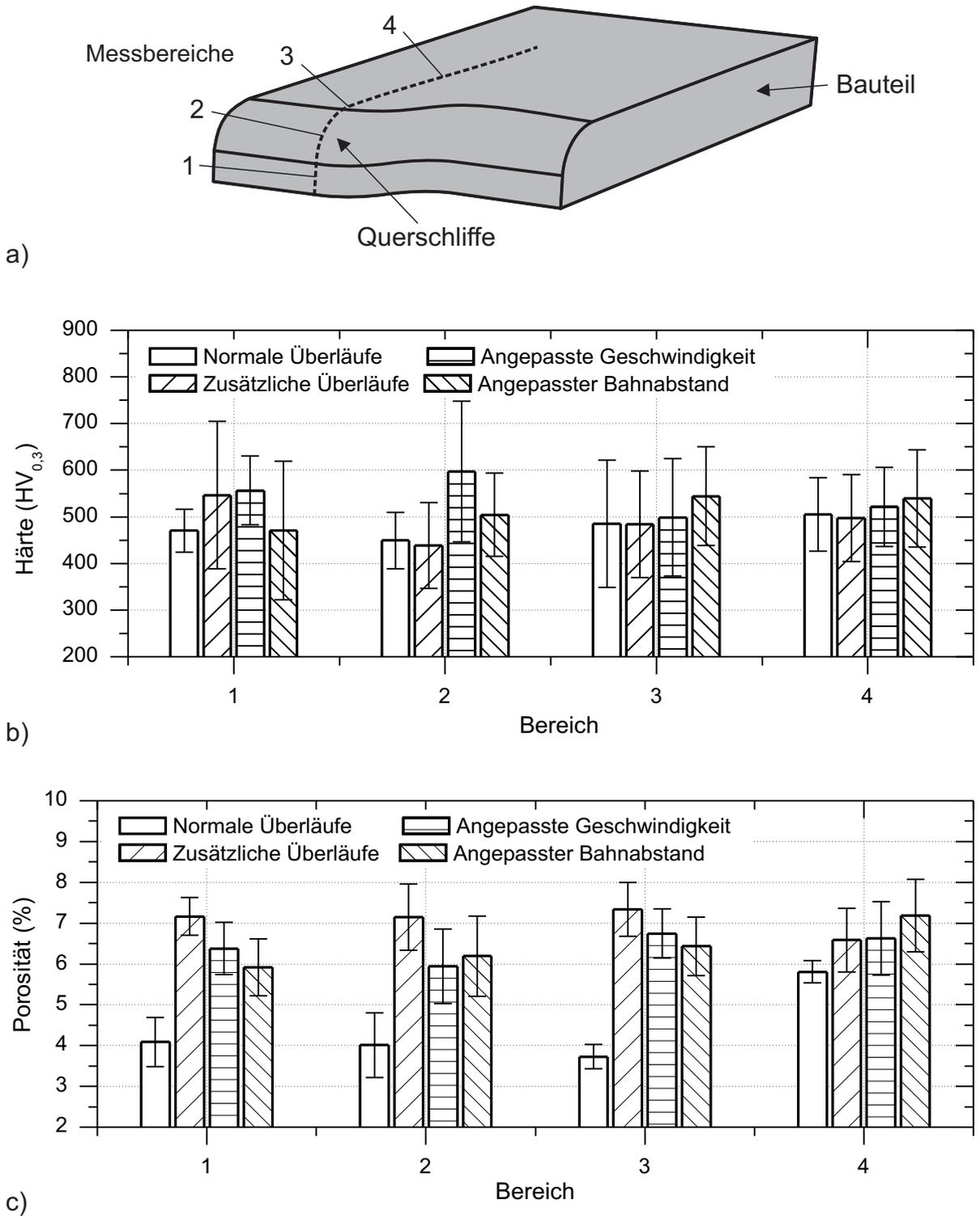


Abbildung 7.14: Vickershärte- und Porositätsmessungen an beschichteten Umformwerkzeugsegmenten. a) Schematische Darstellung der Messbereiche, b) Kleinlasthärte $HV_{0,3}$, c) Porosität

7.3 Fazit

Die Ergebnisse der Beschichtung komplexer Bauteile zeigen, dass durch eine systematische Anwendung der Erkenntnisse aus Kapitel 6 eine endkonturnahe Beschichtung realisiert werden kann. Allerdings müssen hierbei zahlreiche Randbedingungen berücksichtigt werden, die einen Einfluss auf das Beschichtungsergebnis haben.

Die einfachste und flexibelste Möglichkeit die Beschichtungsstrategie an eine Bauteiloberfläche anzupassen, bietet die Verfahrensgeschwindigkeit. Diese kann in weiten Bereichen variiert werden, ohne dass deutliche Qualitätseinbußen der Beschichtung auftreten. Zudem kann die Verfahrensgeschwindigkeit auf einer gegebenen Mäanderbahn im Nachhinein einfach abgeändert werden, ohne dass eine komplett neue Bahnplanung vorgenommen werden muss. Bei Abweichungen der Beschichtung von der Soll-Schichtdicke kann eine Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit durch Einsatz der Gleichung 7.1 durchgeführt werden. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass diese Gleichung nur dann ein genaues Ergebnis liefert, wenn ausschließlich geringe Richtungsänderungen auf der Bauteiloberfläche auftreten. Bei starken Richtungsänderungen kann sie nur zur groben Abschätzung der Verfahrensgeschwindigkeit genutzt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Anpassung der Beschichtungsstrategie an eine komplexe Bauteiloberfläche lässt sich durch eine Variation des Bahnabstandes realisieren. Der Bahnabstand kann, genau wie die Verfahrensgeschwindigkeit, in relativ weiten Bereichen verändert werden, ohne dass signifikante Änderungen der Schichtmikrostruktur auftreten. Wenn die korrekte Verfahrensgeschwindigkeit zur Herstellung einer gleichmäßigen Schichtdicke auf einer Bauteiloberfläche bekannt ist, so kann die Verfahrensgeschwindigkeit mit der Gleichung 7.3 in einen äquivalenten Bahnabstand umgerechnet werden. Bei einer Abänderung eines Bahnabstandes muss allerdings beachtet werden, dass die gesamte Beschichtungsstrategie an diesen neuen Bahnabstand anzupassen ist, da sich alle Mäander auf der Bauteiloberfläche verschieben. In den meisten Fällen ist daher eine Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit einer Anpassung des Bahnabstandes vorzuziehen.

Der Spritzwinkel und der Spritzabstand sollten nach Möglichkeit nur dann variiert werden, wenn dies unumgänglich ist. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn eine Kollision zwischen der Spritzpistole und der Bauteiloberfläche droht. Es gibt auch einige wenige Fälle, wo eine gezielte Anpassung dieser beiden Größen zielführend sein kann. So zeigen die Untersuchungen beispielsweise, dass durch eine Variation des Spritzwinkels oder des Spritzabstandes die Menge und die Verteilung von Over-

spray auf der Bauteiloberfläche gesteuert werden kann. Das kann genutzt werden, um unerwünschten Overspray zu minimieren.

Neben diesen detailliert untersuchten Einflussgrößen auf die Bauteilbeschichtung, gibt es noch weitere Größen, durch die das Beschichtungsergebnis verbessert werden kann. So können an Bereichen, an denen zu dünne Schichten aufgetragen wurden, neben einer Änderung der Verfahrgeschwindigkeit oder des Bahnabstandes, auch zusätzliche Spritzpistolenüberläufe dazu genutzt werden, die Schichtdicke anzugleichen. Diese Vorgehensweise ist besonders interessant, wenn nach einer Beschichtung die Schichtdicke zerstörungsfrei bestimmt werden kann. In diesem Fall kann eine Optimierung der Schichtdicke an einem einzigen Bauteil vorgenommen werden, indem stückweise Bereiche mit einer zu geringen Schichtdicke mit zusätzlichen Überläufen der Spritzpistole beschichtet werden. Allerdings ist die Endkonturnähe der Beschichtung in den meisten Fällen beim Einsatz zusätzlicher Überläufe geringer, als bei einer Variation der Verfahrgeschwindigkeit oder des Bahnabstandes.

Besonders an Bauteilecken oder -kanten kann eine deutlich gleichmäßigere Schichtdicke erzielt werden, wenn eine Auslaufzone genutzt wird. Diese verhindert ein Absinken der Schichtdicke an dem äußeren Bereich des Bauteils und sollte daher immer verwendet werden, soweit es die Bauteilgeometrie zulässt. Die Untersuchungen an einem Bauteil mit Außenwinkel zeigen zudem, dass es auch sinnvoll sein kann auf der Auslaufzone den Spritzwinkel anzupassen, um das Auftreffen unerwünschten Oversprays auf das Bauteil zu verhindern.

Bei allen Bahnstrategien zeigte sich darüberhinaus, dass Schichten mit einer gleichmäßigen Schichtqualität auf der gesamten Bauteiloberfläche erzeugt werden können, wenn die Beschichtungsparameter in den in Kapitel 6 ermittelten Grenzen variiert werden. Dies ist eine wichtige Randbedingung für den späteren Einsatz der beschichteten Bauteile, um eine maximale Schutzfunktion der Beschichtung auf dem gesamten Bauteil zu erhalten.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation wurden Konzepte entwickelt, um beliebige, freigeformte Bauteile mittels der Thermischen Spritzprozesse Atmosphärisches Plasmaspritzen und Lichtbogenspritzen endkonturnah zu beschichten. Das Ziel hierbei war die Untersuchung verfahrensspezifischer Eigenschaften bei der Bauteilbeschichtung, sowie die Herausarbeitung grundsätzlicher Unterschiede zwischen den beiden Spritzverfahren. Im Fokus der Untersuchungen lagen karbidische Spritzzusätze für den Verschleißschutz. Im Atmosphärischen Plasmaspritzprozess wurde dazu ein etabliertes WC-12Co Schichtsystem eingesetzt, während im Lichtbogenspritzprozess ein neueres WSC-Fe Schichtsystem verwendet wurde.

Zunächst wurden mit beiden Schichtsystemen **Prozessparameterstudien** durchgeführt, um die bestgeeignetsten Spritzparameter zu ermitteln, mit denen Schichten mit einer dichten und homogenen Morphologie, einer glatten Topographie, einer guten adhäsiven und kohäsiven Schichthaftung, sowie einer geringen thermischen Zersetzung der Karbide, hergestellt werden können. Für das atmosphärisch **plasmagespritzte Schichtsystem WC-12Co** wurde hierzu ein statistischer Versuchsplan (Central Composite Design) eingesetzt. Mit diesem Versuchsplan wurde der Einfluss der Prozessparameter Verhältnis Ar/H_2 , Gasdurchsatz, Pulverförderrate und Spritzabstand auf Änderungen der Mikrostruktur und Änderungen von Funktionseigenschaften der Beschichtungen untersucht. Durch Einsatz der statistischen Versuchsplanung konnten darüberhinaus Wechselwirkungen zwischen den Parametern betrachtet werden. In den Untersuchungen zeigte sich, dass der Gasdurchsatz den mit Abstand größten Effekt auf die Schichtqualität hat. Insbesondere hohe Gasdurchsätze führen zu guten Schichten, da hier die Spritzpartikel mit einer hohen Partikelgeschwindigkeit auf das Substrat aufprallen und daher bei einer hohen Auftragsrate Schichten mit einer geringeren Porosität, einer hohen Härte und einem geringen Anteil an thermisch zersetz-

ten Karbiden bilden. Im Vergleich dazu, haben die anderen untersuchten Prozessparameter einen eher geringeren Einfluss auf das Beschichtungsergebnis. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte eine Optimierung der Beschichtung durchgeführt werden. Dazu wurden die ermittelten Ergebnisse durch quadratische Regressionsfunktionen angepasst und ein globales Optimum auf Grundlage von Wünschbarkeitsfunktionen bestimmt ($Ar/H_2 = 9,08$, Gasdurchsatz = 78,171/min, Pulverförderrate = 41,28 g/min und Spritzabstand = 115,85 mm). Die Güte des Modells wurde anschließend durch eine Gegenüberstellung von theoretischen und experimentell ermittelten Schichteigenschaften überprüft. Hierbei zeigte sich, dass durch das empirisch bestimmte Modell die Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten und die dazu benötigten Prozessparameter sehr gut vorhergesagt werden können.

Das **lichtbogengespritzte Schichtsystem WSC-Fe** wurde mit einem klassischen Versuchsplan (One-Factor-at-a-Time) optimiert. Hierzu wurden die Prozessparameter Primärgas, Sekundärgas, Spannung und Strom untersucht. Es zeigte sich, dass das Primärgas einen sehr hohen Einfluss auf die Eigenschaften der Spritzschichten hat. Mit zunehmendem Primärgasdruck steigt die Partikelgeschwindigkeit deutlich an, wodurch die Spritzpartikel auf eine höhere Geschwindigkeit beschleunigt werden und dementsprechend mit einer höheren kinetischen Energien auf das Substrat aufprallen. Folglich bilden sich dichte und glatte Schichten. Durch das Sekundärgas kann eine sekundäre, radiale Zerstäubung der Spritzpartikel erreicht werden, durch die sich feinere Spritzpartikel ausbilden und der Spritzstrahl stärker fokussiert wird. Das führt dazu, dass bei höheren Sekundärgasdrücken die Schichten eine geringere Rauheit aufweisen und die Auftragsrate ansteigt. Eine Erhöhung der Spannung hat zur Folge, dass im Lichtbogen gröbere Spritzteilchen abgeschmolzen werden und diese eine radiale Geschwindigkeitskomponente erhalten. Dadurch vergrößert sich der Öffnungswinkel des Spritzstrahls und zugleich bilden sich Schichten mit einer gröberen Mikrostruktur. Bei sehr geringen Spannungen hingegen wird der Lichtbogen instabil und der Spritzprozess beginnt zu fluktuieren. Der Strom hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Schichteigenschaften im Lichtbogenspritzprozess. Ein Anstieg des Stroms wird durch eine Erhöhung der Spritzdraht-Fördergeschwindigkeit realisiert. Das bewirkt, dass sich die Drahtenden im Spritzprozess stärker annähern und ein höherer Strom fließt. Als Konsequenz wird eine größere Menge an Spritzdraht verspritzt und dementsprechend steigt die Auftragsrate an. Gleichzeitig bildet sich jedoch ein größeres Schmelzbad aus, so dass gröbere Spritzteilchen entstehen und folglich die Spritzschichten eine gröbere Schichtstruktur aufweisen. Hinzu kommt, dass durch die höhere Auftragsrate mehr Wärme zu dem Substrat transportiert wird, was zu einem

Anstieg der Substrattemperatur in Verbindung mit einer thermischen Verspannung der Schicht führt. Als optimale Spritzparameter erweisen sich ein Primärgasdruck von 6 bar, ein Sekundärgasdruck von 4 bar, eine Spannung von 30 V und ein Strom von 220 A.

In den folgenden Untersuchungen wurden die Prozessparameter am Optimalwert konstant gehalten und es wurde der **Einfluss der Handhabungsparameter** Spritzwinkel, Spritzabstand, Bahnabstand und Verfahrensgeschwindigkeit auf die Schichtdicke und -qualität untersucht. Zudem wurden empirische Modelle ermittelt, mit denen sich die Schichtauftragsrate als Funktion der Handhabungsparameter vorhersagen lässt. Durch eine Kombination der Handhabungsparameter wurde dann überprüft, ob durch eine gleichzeitige Variation mehrerer Parameter eine gleichmäßige Schichtdicke erzielt werden kann. Außerdem wurde der Einfluss der Bauteilgeometrie anhand von Bauteilen mit Außenwinkeln und Innenradien sowie der Einfluss der Bahnstrategie anhand von Innenradien auf die Eigenschaften der Thermischen Spritzschichten bestimmt.

Die Untersuchungen zeigen, dass die verschiedenen Handhabungsparameter einen deutlichen Einfluss auf die Schichtdicke und -qualität haben. Der **Spritzwinkel** führt beim Lichtbogenspritzen bei $\alpha = 90^\circ$ zu den besten Schichteigenschaften, während beim Atmosphärischen Plasmaspritzen aufgrund einer radialen Pulvereindüsung ein Spritzwinkel von $\alpha = 80^\circ$ zu bevorzugen ist. Unterhalb dieser Optimalwerte verschlechtert sich die Mikrostruktur und die Topographie der Beschichtung. Das ist bei dem Lichtbogenspritzverfahren insbesondere bei $\alpha < 60^\circ$ und bei dem Atmosphärischen Plasmaspritzen bei $\alpha < 50^\circ$ prägnant. Hier tritt ein deutliches Absinken des Auftragswirkungsgrads und der Haftzugfestigkeit auf und gleichzeitig steigen die Schichtporosität und -rauheit an. Für ein gutes Beschichtungsergebnis sollte daher der Spritzwinkel im Lichtbogenspritzprozess in dem Intervall $\alpha = 90^\circ - 60^\circ$ und im Atmosphärischen Plasmaspritzprozess in dem Intervall $\alpha = 90^\circ - 50^\circ$ gehalten werden.

Der **Spritzabstand** hat einen signifikanten Einfluss auf das Schichtgefüge. Bei sehr kleinen Spritzabständen unterhalb von 80 mm, treffen die Spritzpartikel mit geringer kinetischer Energie auf das Substrat auf und es bilden sich Schichten mit einer hohen Porosität, einer hohen Rauheit und einer geringen Härte, die zudem eine hohe Schichtwelligkeit aufweisen. Darüberhinaus dringt die Flamme in das Substrat ein, überhitzt dieses und bewirkt dadurch eine thermisch induzierte Verspannung der Schicht, die zu Hitzerissen führt. Bei mittleren Spritzabständen zwischen 80 mm und 120 mm haben die Spritzpartikel ihre maximale Temperatur erreicht und beginnen im Flug zu erstarren. Bei dem Schichtsystem WC-12Co wird in diesem Intervall eine sprunghafte Ände-

rung der Phasenzusammensetzung in Verbindung mit einer Degradation der Wolframkarbide beobachtet, die einhergeht mit einem Absinken der Porosität, der Rauheit und einem Anstieg der Härte. Bei dem Schichtsystem WSC-Fe treten hingegen nur geringfügige Änderungen der Phasenzusammensetzung auf und folglich lassen sich geringere mikrostrukturelle und topographische Änderungen der Beschichtung beobachten. Oberhalb von 120 mm erstarrt ein Großteil der Partikel in der Flugphase und dementsprechend werden bei einer weiteren Erhöhung des Spritzabstandes nur noch geringe Änderungen der Schichtstruktur beobachtet. Der Spritzabstand sollte daher möglichst am Optimalwert konstant gehalten werden, da eine Modifikation des Spritzabstandes immer auch eine Veränderung der Schichtmikrostruktur impliziert.

Über den **Bahnabstand** kann die Auftragsrate in weiten Bereichen eingestellt werden. Es wurde ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen dem Bahnabstand und der Auftragsrate empirisch ermittelt, der sich auf die geometrischen Bedingungen im Spritzprozess zurückführen lässt. Die Mikrostruktur und die Topographie der Beschichtung bleibt in den Grenzen 3 mm bis 9 mm relativ konstant. Unterhalb von 3 mm tritt dagegen eine übermäßige Aufheizung des Substrats auf, während oberhalb von 9 mm die Schichtwelligkeit stark ansteigt und dadurch die Konturgenauigkeit verloren geht. Zwischen diesen Werten kann der Bahnabstand allerdings relativ frei gewählt werden.

Die **Verfahrgeschwindigkeit** lässt sich ebenfalls sehr gut nutzen, um die Auftragsrate anzupassen. Es konnte ein hyperbolischer Zusammenhang zwischen der Auftragsrate und der Verfahrgeschwindigkeit ermittelt werden, der sich, genau wie bei einer Variation des Bahnabstands, auf die geometrischen Bedingungen im Spritzprozess zurückführen lässt. In dem Intervall 333 mm/s - 833 mm/s beim Atmosphärischen Plasmaspritzen und 100 mm/s - 350 mm/s beim Lichtbogenspritzen kann die Verfahrgeschwindigkeit frei gewählt werden, ohne dass signifikante Änderungen der Schichtmorphologie oder -topographie auftreten. Daraus leitet sich ab, dass die Verfahrgeschwindigkeit der wichtigste Handhabungsparameter ist, um eine Spritzbahn an eine beliebige Bauteiloberfläche anzupassen.

Auf diesen Ergebnissen aufbauende Versuche haben ergeben, dass die verschiedenen Handhabungsparameter nicht nur einzeln genutzt werden können, um eine gleichmäßige Schichtdicke auf einem Bauteil zu erhalten, sondern, dass auch eine sinnvolle **Kombination der Parameter** vorgenommen werden kann. Dabei zeigte sich, dass bei einer Vorhersage der Schichteigenschaften mit den empirisch ermittelten Zusammenhängen Streuungen unterhalb von knapp 6 % erreicht werden. Diese liegen in der Größenordnung der statistischen Schwankungen des Spritzprozesses und sind damit als

sehr genau zu bewerten.

Der Einfluss der **Bauteilgeometrie** auf die Schichtdicken- und Schichtqualitätsverteilung wurde anhand von regelgeometrischen Bauteilen mit Winkeln und Radien überprüft. Es zeigte sich, dass bei Einsatz einer konventionellen Bahnstrategie die Schichtdicke insbesondere an Außenwinkeln und Außenradien abfällt, während eine Überhöhung an Bereichen mit Innenwinkeln und Innenradien auftritt. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter, je kleiner der Winkel oder Radius ist. Außerdem konnte beobachtet werden, dass der Lichtbogenspritzprozess aufgrund seines höheren Öffnungswinkels des Spritzstrahls empfindlicher als der Atmosphärische Plasmaspritzprozess auf Änderungen der Bauteilkontur reagiert.

Die **Bahnstrategie** hat ebenfalls einen großen Einfluss auf das Beschichtungsergebnis. Es muss hierbei beachtet werden, dass der Roboter auf der gesamten Bauteiloberfläche die vorgegebene Verfahrensgeschwindigkeit und Spritzbahn einhält. Andernfalls treten unerwünschte Änderungen in der Schichtdicke auf, da die begrenzte Dynamik des Beschichtungsroboters die Beschleunigung der Spritzpistole und die Bahntreue im Spritzprozess limitiert.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Einflussgrößen auf die **Bauteilbeschichtung** wurden anschließend genutzt, um die Spritzbahn auf **regelgeometrischen Bauteilen** mit einem Außenwinkel von $\gamma = 90^\circ$ und mit einem Innenradius von $r = 40 \text{ mm}$ sowie auf einem **Umformwerkzeugsegment** an die Bauteiloberfläche anzupassen. Auf den Bauteilen mit dem Außenwinkel $\gamma = 90^\circ$ zeigte sich, dass durch eine Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit eine relativ gleichmäßige Schichtdicke erzielt werden kann. Eine weitere Verbesserung des Beschichtungsergebnisses ließ sich durch das Hinzufügen einer zusätzlichen Auslaufzone für die Spritzpistole an dem Außenwinkel erlangen. In beiden Fällen wurden keine deutlichen Änderungen der Schichtqualität auf der Bauteiloberfläche beobachtet. Auf dem Bauteil mit dem Innenradius $r = 40 \text{ mm}$ stellte es sich als schwierig heraus, eine gleichmäßige Schichtdicke auf der gesamten Bauteiloberfläche zu erzeugen. Problematisch ist hierbei die Tatsache, dass an dem Übergang zwischen der Stirnfläche und dem Innenradius in allen Fällen Overspray auftritt, der nur durch eine aufwendige Anpassung der Bahnplanung berücksichtigt werden kann. Eine geringfügige Verbesserung der Schichtthomogenität ließ sich durch eine Anpassung des Spritzwinkels bzw. durch eine Anpassung des Spritzabstandes erzielen. Auf dem Umformwerkzeugsegment konnten verschiedene Bahnstrategien genutzt werden, um eine gleichmäßige Schichtdicke und konstante Schichteigenschaften auf der gesamten Bauteiloberfläche zu erzeugen. Vielversprechende Ergebnisse lieferten dabei eine Anpassung der Verfahrensgeschwindigkeit, das Hinzufügen zusätzlicher

Überläufe der Spritzpistole sowie eine Anpassung des Bahnabstandes.

Es konnte damit gezeigt werden, dass durch eine gezielte Anpassung der Spritzparameter und der Bahnplanungsparameter eine hochqualitative Beschichtung auf fast beliebigen Bauteilen erzeugt werden kann. Bei einer genauen Planung der Beschichtungsversuche und einer Berücksichtigung der relevanten Handhabungsparameter im Beschichtungsprozess weist die resultierende Spritzschicht die gewünschten Schichteigenschaften wie eine hohe Endkonturnähe in Verbindung mit einer homogenen und dichten Mikrostruktur, einer glatten Topographie, geringen Karbidzersetzungen und so einer hohen Verschleißfestigkeit auf.

In **zukünftigen Arbeiten** sollten die vorgestellten Erkenntnisse aufgegriffen werden und als Basis zur endkonturnahen Beschichtung komplexer Bauteile dienen. Bei der Beschichtung von Bauteilen mit einer sehr hohen Geometriekomplexizität stoßen die empirisch ermittelten Modelle für die Auftragsrate allerdings an ihre Grenzen. Eine wichtige Erweiterung dieser Arbeit ist daher eine gezielte Anpassung der Modelle an komplexe Bauteiloberflächen, wodurch eine konsequente Weiterentwicklung der Modelle realisiert werden kann. Dies ermöglicht auch auf Bauteilen mit spitzen Winkeln oder engen Radien auf der Bauteiloberfläche eine genaue Vorhersage der Schichtdicke.

Weiterhin ist eine Grundvoraussetzung zur Erzielung gleichmäßiger Schichtdicken und -qualitäten auf beliebig geformten Bauteiloberflächen eine enge Vernetzung zwischen der Bahnplanung, der Versuchsdurchführung und der Auswertung der Beschichtungsergebnisse. Bei zukünftigen Versuchen ist es daher empfehlenswert, die Dynamik und Kinematik des Beschichtungsroboters noch stärker in die Bahnplanung zu integrieren, indem Modelle für die Trägheit des Beschichtungsroboters aufgestellt werden und die Ergebnisse der Beschichtungsversuche mit den tatsächlichen Achsbewegungen des Beschichtungsroboters korreliert werden. Eine sinnvolle Erweiterung der Schichtanalytik ist zudem eine zerstörungsfreie Ermittlung der Schichtdickenverteilung über die Bauteiloberfläche, die sich während oder unmittelbar nach dem Beschichtungsprozess durchführen lässt. Dadurch können Fehlbeschichtungen zeitnah detektiert und Untermaße der Beschichtung direkt an dem untersuchten Bauteil beseitigt werden.

Literaturverzeichnis

- [AAMD09] AALAMI-ALEAGHA, M. ; MADAENI, S. ; DARAEI, P.: A New Application of Thermal Spray in Preparation of Metallic Membrane for Concentration of Glucose Solution. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 18 (2009), Nr. 4, S. 519–524
- [ABB10] ABB AG: *RobotStudio*. <http://www.abb.de/product/seitp327/b357cd0ca80f7bb0c12570c9003fffa9.aspx>. Version: 2010
- [ACSL05] ARAUJO, P. ; CHICOT, D. ; STAIA, M. ; LESAGE, J.: Residual stresses and adhesion of thermal spray coatings. In: *Surface Engineering* 21 (February 2005), S. 35–40(6)
- [AGM⁺08] ARCONDÉGUY, A. ; GASGNIER, G. ; MONTAVON, G. ; PATEYRON, B. ; DENOIRJEAN, A. ; GRIMAUD, A. ; HUGUET, C.: Effects of spraying parameters onto flame-sprayed glaze coating structures. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (2008), Nr. 18, S. 4444–4448
- [AH98] AMADA, S. ; HIROSE, T.: Influence of grit blasting pre-treatment on the adhesion strength of plasma sprayed coatings: fractal analysis of roughness. In: *Surface and Coatings Technology* 102 (1998), Nr. 1-2, S. 132–137
- [Ali10] ALICONA IMAGING GMBH: *Optische 3D Oberflächenmesstechnik: Infinite Focus, Alicona*. 2010
- [AMH⁺06] ANTOU, G. ; MONTAVON, G. ; HLAWKA, F. ; CORNET, A. ; CODDET, C.: Exploring thermal spray gray alumina coating pore network architecture by combining stereological protocols and impedance electrochemical spectroscopy. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 15 (2006), Nr. 4, S. 765–772
- [AOMY86] ARATA, Y. ; OHMORI, A. ; MORIMOTO, J. ; YAMAGUCHI, A.: Influence of Processing Conditions on the Thermal Spraying Coating (Materials,

- Metallurgy & Weldability). In: *Transactions of JWRI* 15 (1986), Nr. 1, S. 93–98
- [AT97] ASAKAWA, N. ; TAKEUCHI, Y.: Teachingless spray-painting of sculptured surface by an industrial robot. In: *Proceeding of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation* , New Mexico (1997), S. 1875–1879
- [Aut10] AUTODESK: *AutoCAD*. <http://www.autodesk.de/adsk>. Version: 2010
- [AVM02] AHMANIEMI, S. ; VUORISTO, P. ; MÄNTYLÄ, T.: Optimisation of the robot controlled plasma spraying of thermal barrier coating for gas turbine transition duct. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002*. Essen : DVS Media GmbH, 2002, S. 208–212
- [BBBV00] BIANCHI, L. ; BARADEL, N. ; BERTRAN-VIDAL, G.: Influence of Plasma Spraying Parameters on Coating Damage. In: *Thermal Spray Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference 2000*. Montreal : ASM International, 2000, S. 29–36
- [BBJC01] BOLOT, R. ; BONNET, R. ; JANDIN, G. ; CODDET, C.: Application of CAD to CFD for the Wire Arc Spray Process. In: BERNDT, C. C. (Hrsg.) ; KHOR, K. A. (Hrsg.) ; LUGSCHEIDER, E. (Hrsg.): *Thermal spray 2001: New surfaces for a new millenium; proceedings of the 2nd International Thermal Spray Conference*. Singapur : ASM International, 2001, S. 889–894
- [BBL03] BOLOT, R. ; BONNET, R. ; LI, R.: Modeling of the Substrate Temperature Evolution during the APS Thermal Spray Process. In: *Thermal Spray 2003: Advancing the Science and Applying the Technology, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2003*. Ohio : ASM International, 2003, S. 949–954
- [BBR04] BOSSOUTROT, C. ; BRAILLARD, F. ; RENAULT, T.: Preliminary studies of a closed-loop for a feedback control of air plasma spray process. In: *Thermal Spray Solutions: Advances in technology and application, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2004*. Osaka : DVS Media GmbH, 2004
- [BBR⁺08] BERTRAND, G. ; BERTRAND, P. ; ROY, P. ; RIO, C. ; MEVREL, R.: Low conductivity plasma sprayed thermal barrier coating using hollow psz spheres: Correlation between thermophysical properties and microstructure. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (2008), Nr. 10, S. 1994–2001

- [BCM99] BUSSMANN, M. ; CHANDRA, S. ; MOSTAGHIMI, J.: Numerical results of off-angle thermal spray particle impact. In: *Conference Proceedings UTSC 99, United Thermal Spray Conference and Exposition, Beschichten für die Praxis*. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 1999, S. 17–19
- [BCT⁺01] BACH, Fr W. ; COPITZKY, T. ; TEGEDER, G. ; PREHM, J. ; DUDA, T.: Untersuchung des Lichtbogenspritzprozesses mit der Particle Image Velocimetry. In: *Tagungsband der 9. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik*. Winterthur, Schweiz, 2001, S. 12.1–12.7
- [Ber04] BERNDT, C. C.: Material Categories for Thermal Sprayed Coatings. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 142–146
- [BIC02] BOLOT, R. ; IMBERT, M. ; CODDET, C.: Three Dimensional Transient Modeling of the Substrate Temperature Evaluation during the Coating Elaboration. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002*. Essen : DVS Media GmbH, 2002, S. 979–984
- [BL07] BENDER, R. ; LANGE, S.: Was ist der p-Wert? In: *Deutsche Medizinische Wochenschrift* (2007), Nr. 132, S. 15–16
- [BML06] BUCHMANN, M. ; MATZ, M. M. ; LERCHL, T.: Einsatz von Thermisch gespritzten Schichten im Automobilbau. In: *Tagungsband zum 3. GTV Kolloquium Thermisches Spritzen*. Luckenbach, 2006, S. 43–52
- [BNW04] BAHBOU, M. ; NYLÉN, P. ; WIGREN, J.: Effect of grit blasting and spraying angle on the adhesion strength of a plasma-sprayed coating. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 13 (2004), Nr. 4, S. 508–514
- [Bor91] BORISOV, Y.: Plasma Spraying of Coatings using a Protective Nozzle. In: *2nd Plasma Technik Symposium*. Luzern : Plasma Technik Wohlen CH, 1991, S. 161–172
- [Bou92] BOULOS, M.: RF induction plasma spraying: State-of-the-art review. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 1 (1992), Nr. 1, S. 33–40
- [BR98] BRANDT, O. ; ROHR, L.: *Ermüdungsverhalten thermischer Spritzschichten: Bericht Nr. 162161*. Thun, Diss., 1998
- [BS99] BRANDT, O. ; SIEGMANN, S.: Möglichkeiten des reaktiven thermischen Spritzens von neuen Eisenbasislegierungen. In: *Conference Proceedings*

UTSC 99, United Thermal Spray Conference and Exposition, Beschichten für die Praxis. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 1999, S. 259–264

- [BW05] BABIAK, Z. ; WENZ, T.: Grundlagen der thermischen Spritztechnik, Flamm- und Lichtbogenspritzen. In: BACH, Fr W. (Hrsg.): *Moderne Beschichtungsverfahren.* Weinheim : Wiley-VCH, 2005. – ISBN 3527309772, S. 131–147
- [BW07] BOBZIN, K. ; WIELAGE, B.: *DVS-Berichte. Bd. 245: Thermisches Spritzen - Potentiale, Entwicklungen, Märkte: [Studie & Vorträge des DVS-Forschungsseminars "Die Technik des Thermischen Spritzens - Potentiale, Forschung, Märkte"]*. Düsseldorf : DVS-Verl., 2007. – ISBN 9783871552519
- [CG06] CANDEL, A. ; GADOW, R.: Optimized multiaxis robot kinematic for HVOF spray coatings on complex shaped substrates: The 2nd International Meeting on Thermal Spraying - 2nd RIPT. In: *Surface and Coatings Technology* 201 (2006), Nr. 5, S. 2065–2071
- [CG09a] CANDEL, A. ; GADOW, R.: Advanced Robot Programming and Coupled Numerical Simulation of Heat Transfer for Thermal Spraying. In: *Thermal Spray 2009: Expanding Thermal Spray Performance to New Markets and Applications, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2009.* Las Vegas : ASM International, 2009, S. 487–491
- [CG09b] CANDEL, A. ; GADOW, R.: Trajectory Generation and Coupled Numerical Simulation for Thermal Spraying Applications on Complex Geometries. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 18 (2009), Nr. 5, S. 981–987
- [CGL04] CANDEL, A. ; GADOW, R. ; LOPEZ, D.: Advanced robot assisted manufacturing and control system for the internal HVOF series coating process. In: *SAE transactions: papers presented at Society and Section meetings/ Society of Automotive Engineers* 113 (2004), Nr. 5, S. 232–237
- [COBP07] COOKE, K. ; OLIVER, G. ; BUCHANAN, V. ; PALMER, N.: Optimisation of the electric wire arc-spraying process for improved wear resistance of sugar mill roller shells. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (2007), Nr. 1, S. 185–188
- [Cor99] CORPS OF ENGINEERS WASHINGTON DC: *Engineering and Design. Thermal Spraying: New Construction and Maintenance.* 1999

- [CPN00] CZERNICHOWSKI, A. ; PAWLOWSKI, L. ; NITOUUMBI, B.: Injection of hot particles in the plasma flame. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 9 (2000), Nr. 4, S. 458–462
- [Cra04a] CRAWMER, D. E.: Process Control Equipment. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956
- [Cra04b] CRAWMER, D. E.: Thermal Spray Processes. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 54–76
- [CWZ01] CHEN, Y. ; WANG, G. ; ZHANG, H.: Numerical simulation of coating growth and pore formation in rapid plasma spray tooling. In: *Thin Solid Films* 390 (2001), Nr. 1-2, S. 13–19
- [CX08] CHEN, H. ; XI, N.: Automated tool trajectory planning of industrial robots for painting composite surfaces. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35 (2008), Nr. 7, S. 680–696
- [Das10] DASSAULT SYSTÈMES SOLIDWORKS CORP.: *SolidWorks*. <http://www.solidworks.com>. Version: 2010
- [Dav04] DAVIS, J. R.: Coating Structures, Properties, and Materials. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 47–53
- [DL08] DÖRING, J. E. ; LANGER, G.: Die Vielfalt des Thermischen Spritzens - Anwendungsbeispiele aus der Praxis. In: *Taschenbuch Oberflächentechnik*. München : I.G.T. Informationsgesellschaft Technik mbH, 2008, S. 51–58
- [DLLC06] DENG, S. ; LI, H. ; LIAO, H. ; CODDET, C.: New Functions of Thermal Spray Toolkit A Software Developed for Off-line and Rapid Robot Programming. In: *Thermal Spray 2006: Building on 100 Years of Success, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2006*. Ohio : ASM International, 2006, S. 1437–1442
- [DLZ⁺05] DENG, S. ; LIAO, H. ; ZENG, C. ; CHARLES, P. ; CODDET, C.: Robotic trajectory autogeneration in thermal spraying. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2005*. Basel : DVS Media GmbH, 2005, S. 481–485

- [Dro92] DROZAK, J.: *Teilcheneigenschaften und Haftung beim thermischen Spritzen von Metall und Keramik*. Dortmund, Universität Dortmund, Diss., 1992
- [Dur05] DURUM VERSCHLEISSCHUTZ GMBH: *Katalog der Spritzwerkstoffe*. Willich, 2005
- [DV99] DEAN, A. ; VOSS, D.: *Design and analysis of experiments*. New York : Springer, 1999 (Springer texts in statistics). – ISBN 9780387985619
- [DZT09] DIAO, X. D. ; ZENG, S. X. ; TAM, Vivian W. Y.: Development of an optimal trajectory model for spray painting on a free surface: Collaborative e-Work Networks in Industrial Engineering. In: *Computers & Industrial Engineering* 57 (2009), Nr. 1, S. 209–216
- [Exn79] EXNER, H. E.: Physical and Chemical Nature of Cemented Carbides. In: *Int. Met. Rev.* (1979), Nr. 24, S. 149
- [FCV⁺87] FAUCHAIS, P. ; COUDERT, J. F. ; VARDELLE, M. ; VARDELLE, A. ; GRIMAUD, A.: State of the art for the understanding of the physical phenomena involved in plasma spraying at atmospheric pressure. In: *Thermal Spray: Advances in Coatings Technology, Proceedings of the National Thermal Spray Conference 1987*. OH, USA, 1987, S. 11
- [FCVG88] FAUCHAIS, P. ; COUDENT, J. F. ; VERDELL, M. ; GRIMAND, A.: State of the art of the understanding of the physical phenomenon involved in plasma spraying at atmospheric pressure. In: *Thermal Spray: Advances in Coatings Technology*. ASM International, 1988, S. 11–22
- [FDLC10] FANG, D. ; DENG, S. ; LIAO, H. ; CODDET, C.: The Effect of Robot Kinematics on the Coating Thickness Uniformity. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 19 (2010), Nr. 4, S. 796–804
- [Fes95] FESLON, A.: Plasma Spraying at Controlled Temperature and Atmosphere. In: *Advances in Thermal Spray Science and Technology, Proceedings of the 8th National Spray Conference 1995*. Ohio : ASM International, 1995, S. 57–63
- [FH02] FINKENWIRTH, O. ; HOFERER, S.: Thermographical heat load in-situ-measurement and FEM-simulation of solid oxide fuel cell (SOFC) components during fabrication via vacuum plasma spraying (VPS). In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002*. Essen : DVS Media GmbH, 2002, S. 567–572

- [Flo09] FLORISTAN, M.: Electrically Conductive Plasma Sprayed Oxide-Metal Coatings on Glass Ceramic Substrates. In: *Thermal Spray 2009: Expanding Thermal Spray Performance to New Markets and Applications, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2009*. Las Vegas : ASM International, 2009, S. 612–617
- [FPNW01] FRIIS, M. ; PERSSON, C. ; NYLÉN, P. ; WIGREN, J.: Investigation of particle in-flight characteristics during atmospheric plasma spraying of yttria-stabilized ZrO₂: Part 1. Experimental. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 10 (2001), Nr. 2, S. 301–310
- [FPW93] FASCHING, M. ; PRINZ, F. ; WEISS, L.: Planning robotic trajectories for thermal spray shape deposition. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 2 (1993), Nr. 1, S. 45–57
- [FSH94] FINCKE, J. R. ; SWANK, W. D. ; HAGGARD, D. C.: Comparison of the Characteristics of HVOF and Plasma Thermal Spray. In: *Thermal Spray Industrial Applications* (1994), S. 325–330
- [FSWT06] FAHRENWALDT, H. J. ; SCHULER, V. ; WITTEL, H. ; TWDREK, J.: *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung ; mit 141 Tabellen*. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg [u.a.], 2006 (Vieweg Praxiswissen). – ISBN 3871559709
- [FTCLX99] FUKANUMA, H. ; TODA CITY, J. ; LI, C. J. ; XIAN, T. J.: Mathematical modeling of splat formation at off-normal angles in thermal spray. In: *Conference Proceedings UTSC 99, United Thermal Spray Conference and Exposition, Beschichten für die Praxis*. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 1999, S. 513–518
- [FV94] FAUCHAIS, P. ; VARDELLE, M.: Plasma spraying: present and future. In: *Pure & Appl. Chem.* 66 (1994), Nr. 6, S. 1247–1258
- [FVD01] FAUCHAIS, P. ; VARDELLE, A. ; DUSSOUBS, B.: Quo vadis thermal spraying? In: *Journal of Thermal Spray Technology* 10 (2001), Nr. 1, S. 44–66
- [FWP92] FASCHING, M. M. ; WEISS, L. E. ; PRINZ, F. B.: Optimization of Robotic Trajectories For Thermal Spray Shape Deposition. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Thermal Spraying*. Orlando : ASM International, 1992

- [GBL⁺03] GEDZEVICIUS, I. ; BOLOT, R. ; LIAO, H. ; CODDET, C. ; VALIULIS, A. V.: Application of CFD for wire-arc nozzle geometry improvement. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2003: Advancing the Science Applying the Technology*. Orlando FL USA, 2003, S. 977–980
- [GCF10] GADOW, R. ; CANDEL, A. ; FLORISTÁN, M.: Optimized robot trajectory generation for thermal spraying operations and high quality coatings on free-form surfaces. In: *Surface and Coatings Technology* 205 (2010), Nr. 4, S. 1074–1079
- [GDRJ06] GRANT, P. ; DUNCAN, S. ; ROCHE, A. ; JOHNSON, C.: Scientific, technological, and economic aspects of rapid tooling by electric arc spray forming. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 15 (2006), Nr. 4, S. 796–801
- [Ger04] GERICK, A.: *Potenzial von neuartigen LM-legierten Stählen für den Fahrzeugbau*. Dresden, Technische Universität Dresden, Diss., 2004
- [GKKW08] GADOW, R. ; KILLINGER, A. ; K. WERMBTER, C. L.: Product Development with Thermally Sprayed Functional Coatings on Glass and Glass Ceramics Substrates. In: WALTRAUD, M. K. (Hrsg.) ; HUA-TAY, L. (Hrsg.): *27th Annual Cocoa Beach Conference on Advanced Ceramics and Composites: A: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Volume 24, Issue 3*. 2008, S. 601–614
- [GMC02] GUESSASMA, S. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C.: On the neural network concept to describe the thermal spray deposition process: an introduction. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2002*. Essen : DVS Media GmbH, 2002, S. 435–439
- [GMC04] GUESSASMA, S. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C.: Modeling of the APS plasma spray process using artificial neural networks: basis, requirements and an example. In: *Computational Materials Science* 29 (2004), Nr. 3, S. 315–333
- [GPS10] GRIEB, M. ; PIELKEN, S. ; SCHMELTER, T.: *Herstellung und Optimierung von hartstoffhaltigen Schichtsystemen mittels atmosphärischen Plasmaspritzen und Lichtbogenspritzen zum Einsatz als Verschleißschicht auf Tiefziehwerkzeugen: Projektarbeit*. Technische Universität Dortmund, 2010
- [GSR94] GREVING, D. J. ; SHADLEY, J. R. ; RYBICKI, E. F.: Effects of Coating Thickness and Residual Stresses on Bond Strength of C633-79 Thermal Spray

- Coating Test Specimens. In: *Proceedings of the 7th National Thermal Spray Conference*. Boston, 1994, S. 639–647
- [GTMC04] GUESSASMA, S. ; TRIFA, F. I. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C.: Al₂O₃-13% weight TiO₂ deposit profiles as a function of the atmospheric plasma spraying processing parameters. In: *Materials & Design* 25 (2004), Nr. 4, S. 307–315
- [GTZ91] GIORDANO, L. ; TIZIANI, A. ; ZAMBON, A.: Comparison Between WC-Co Coatings Obtained by APS and CDS on Carbon Steel. In: *Proceedings of the 2nd European Conference on Advanced Materials and Processes: Euromat 91*. Cambridge : IOM Communications Ltd., 1991, S. 307–315
- [GUSNK97] GOWRI, S. ; UMA SHANKAR, G. ; NARAYANASAMY, K. ; KRISHNAMURTHY, R.: Expert system for process optimization of atmospheric plasma spraying of high performance ceramics. In: *Journal of Materials Processing Technology* 63 (1997), Nr. 1-3, S. 724–732
- [GV97] GEORGIOPOULOS, I. ; VARDAVOULIAS, M.: High temperature sliding wear mechanisms of thermal sprayed cemented carbide coatings. In: *Surface Modification Technologies XI*. Paris, 1997, S. 934–943
- [GV03] GEDZEVICIUS, I. ; VALIULIS, A. V.: Influence of the Particles Velocity on the Arc Spraying Coating Adhesion. In: *Materials Science* 9 (2003), Nr. 4, S. 334–337
- [GV06] GEDZEVICIUS, I. ; VALIULIS, A. V.: Analysis of wire arc spraying process variables on coatings properties: Achievements in Mechanical & Materials Engineering. In: *Journal of Materials Processing Technology* 175 (2006), Nr. 1-3, S. 206–211
- [HB99] HARRIS, A. F. ; BEEVERS, A.: The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 (1999), Nr. 6, S. 445–452
- [HH01] HUSSARY, N. ; HEBERLEIN, J.: Atomization and particle-jet interactions in the wire-arc spraying process. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 10 (2001), Nr. 4, S. 604–610
- [HH03] HUSSARY, N. ; HEBERLEIN, J.: Primary Breakup of Metal in the Wire Arc Spray Process. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*

2003: *Advancing the Science Applying the Technology*. Orlando FL USA, 2003, S. 1023–1032

- [HHEI04] HELLER, T. ; HOFFMANN, O. ; ETZOLD, U. ; IMLAU, K. P.: Neue Stähle für moderne Fahrzeugkarosserien. In: *Sonderbände der praktischen Metallographie* 36 (2004), S. 9–18
- [HKF70] HASUI, A. ; KITAHARA, S. ; FUKUSHIMA, T.: On Relation between Properties of Coating and Spray Angle in Plasma Jet Spraying. In: *Trans. Nat. Res. Inst. Met.* 12 (1970), Nr. 1, S. 9–20
- [HKM94] HARTMANN, K. ; KRISHNAN, R. ; MERZ, R.: Robot-Assisted Shape Deposition Manufacturing. In: *Proceedings of the 1994 International IEEE Conference on Robotics and Automation*. San Diego : IEEE International, 1994, S. 2890–2896
- [HKZ10] HOUDKOVÁ, Š. ; KAŠPAROVÁ, M. ; ZAHÁLKA, F.: The Influence of Spraying Angle on Properties of HVOF Sprayed Hardmetal Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* (2010), S. 1–9
- [HMS⁺99] HENNE, B. ; MÜLLER, M. ; SCHILLER, G. ; PROSS, E. ; GITZHOFFER, F. ; BOULOS, M.: Near-net-shape forming of metallic bipolar plates for planar solid oxide fuel cells by induction plasma spraying. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 8 (1999), Nr. 1, S. 110–116
- [HN99] HANSBO, A. ; NYLÉN, P.: Models for the simulation of spray deposition and robot motion optimization in thermal spraying of rotating objects. In: *Surface and Coatings Technology* 122 (1999), Nr. 2-3, S. 191–201
- [HNWY05] HEPING, C. ; NING, X. ; WEIHUA, S. ; YIFAN, C.: General Framework of Optimal Tool Trajectory Planning for Free-Form Surfaces in Surface Manufacturing. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 127 (2005), Nr. 1, S. 49–59
- [HR02] HAEPF, H. J. ; ROLL, K.: Zukünftige Herausforderungen in der Umformtechnik. In: *9. Sächsische Fachtagung Umformtechnik Dresden*. 2002, S. 17–28
- [HSH98] HALE, D. ; SWANK, W. ; HAGGARD, D.: In-Flight particle measurements of twin wire electric arc sprayed aluminum. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 7 (1998), Nr. 1, S. 58–63

- [IAL⁺97] ILAVSKY, J. ; ALLEN, A. J. ; LONG, G. G. ; KRUEGER, S. ; BERNDT, C. C. ; HERMAN, H.: Influence of Spray Angle on the Pore and Crack Microstructure of Plasma-Sprayed Deposits. In: *Journal of the American Ceramic Society* 80 (1997), Nr. 3, S. 733–742
- [IKN99] ILVASKY, J. ; KOLMAN, B. ; NEUFUSS, K. Chraska P.: Influence of the spray angle on the microstructure of YSZ and alumina plasma-sprayed deposits. In: *Conference Proceedings UTSC 99, United Thermal Spray Conference and Exposition, Beschichten für die Praxis* Bd. 2. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 1999, S. 820–824
- [JMS99] JIANG, X. ; MATEJICEK, J. ; SAMPATH, S.: Substrate temperature effects on the splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings: Part II: case study for molybdenum. In: *Materials Science and Engineering A* 272 (1999), Nr. 1, S. 189–198
- [JMV⁺99] JANISSON, S. ; MEILLOT, E. ; VARDELLE, A. ; COUDERT, J. ; PATEYRON, B. ; FAUCHAIS, P.: Plasma spraying using Ar-He-H₂ gas mixtures. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 8 (1999), Nr. 4, S. 545–552
- [JPP⁺08] JAWORSKI, R. ; PIERLOT, C. ; PAWLOWSKI, L. ; BIGAN, M. ; QUIVRIN, M.: Synthesis and Preliminary Tests of Suspension Plasma Spraying of Fine Hydroxyapatite Powder. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 17 (2008), Nr. 5, S. 679–684
- [JWHS01] JIANG, X. ; WAN, Y. ; HERMAN, H. ; SAMPATH, S.: Role of condensates and adsorbates on substrate surface on fragmentation of impinging molten droplets during thermal spray. In: *Thin Solid Films* 385 (2001), Nr. 1-2, S. 132–141
- [KA08] KLEIN, M. ; ALEX, D.: *Einführung in die DIN-Normen*. 14., neubearb. Aufl., [Stand: Sommer 2007]. Wiesbaden, 2008
- [Kai04] KAINER, K. U.: *Metallische Verbundwerkstoffe*. Weinheim, 2004
- [KB04] KRÖMER, B. ; BREER, J.: Umformmaschine 2010 im Visier. Zwischen "Spring-Back", Simulation und Superstählen. In: *Bänder Bleche Rohre* 45 (2004), Nr. 3, S. 66–70
- [KBSL00] KUCUK, A. ; BERNDT, C. C. ; SENTURK, U. ; LIMA, R. S.: Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized

- zirconia coatings. II: Acoustic emission response. In: *Materials Science and Engineering A* 284 (2000), Nr. 1-2, S. 41–50
- [KH02] KELKAR, M. ; HEBERLEIN, J.: Wire-Arc Spray Modeling. In: *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 22 (2002), Nr. 1, S. 1–25
- [KHSS08] KUHLENKÖTTER, B. ; HYPKI, A. ; SCHEELE, C. ; SCHYJA, A.: Analyse und Fortentwicklung robotergestützter Spritz- und Verdichtungsprozesse durch simulationsbasierte Bahnplanung und Werkzeuganpassung. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 708, 3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-*. Dortmund : Praxiswissen, 2008, S. 23–31
- [KKC94] KIM, H. ; KWEON, Y. ; CHANG, R.: Wear and erosion behavior of plasma-sprayed WC-Co coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 3 (1994), Nr. 2, S. 169–178
- [Kle08] KLEIJNEN, J. P. C.: *Design and Analysis of Simulation Experiments*. Bd. 111. Boston : Springer Science+Business Media LLC, 2008. – ISBN 978–0–387–71812–5
- [KM10] KOUT, A. ; MÜLLER, H.: *A Framework for the Generation of Distance Field Based Curves on Triangular Mesh Surfaces for NC Manufacturing: Technical Report*. Dortmund, 2010. – Technical Report
- [KN06] KANG, C. W. ; NG, H. W.: Splat morphology and spreading behavior due to oblique impact of droplets onto substrates in plasma spray coating process. In: *Surface and Coatings Technology* 200 (2006), Nr. 18-19, S. 5462–5477
- [KNR98] KANOUFF, M. ; NEISER, R. ; ROEMER, T.: Surface roughness of thermal spray coatings made with off-normal spray angles. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 7 (1998), Nr. 2, S. 219–228
- [KNY06] KANG, C. ; NG, H. ; YU, S.: Imaging diagnostics study on obliquely impacting plasma-sprayed particles near to the substrate. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 15 (2006), Nr. 1, S. 118–130
- [KNY07] KANG, C. ; NG, H. ; YU, S.: Plasma Spray Deposition on Inclined Substrates: Simulations and Experiments. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 16 (2007), Nr. 2, S. 261–274

- [KS09] KUHLENKÖTTER, B. ; SCHEELE, C.: Untersuchungen zur Prozessführung beim robotergestützten Thermischen Spritzen komplexer Geometrien. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 708, 3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-*. Dortmund : Praxiswissen, 2009, S. 43–50
- [KS10] KUHLENKÖTTER, B. ; SCHEELE, C.: Prozessführung zeitlich und räumlich gekoppelter Handhabungsvorgänge bei kleinen Losgrößen. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-*. Dortmund : Praxiswissen, 2010, S. 53–61
- [KSS91] KINGSWELL, R. ; SCOTT, K. T. ; SORENSEN, B.: Measurement of Residual stress in Plasma sprayed ceramic coating. In: *2nd Plasma Technik Symposium*. Luzern : Plasma Technik Wohlen CH, 1991, S. 130–136
- [KUK10] KUKA ROBOTER GMBH: *KUKA Sim Pro*. http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/software/kuka_sim/kuka_sim_detail/PS_KUKA_Sim_Pro.htm. Version: 2010
- [KVG⁺03] KULKARNI, A. ; VAIDYA, A. ; GOLAND, A. ; SAMPATH, S. ; HERMAN, H.: Processing effects on porosity-property correlations in plasma sprayed yttria-stabilized zirconia coatings. In: *Materials Science and Engineering A* 359 (2003), Nr. 1-2, S. 100–111
- [LB97] LEIGH, S. H. ; BERNDT, C. C.: Evaluation of off-angle thermal spray. In: *Surface & Coatings Technology* 89 (1997), Nr. 3, S. 213–224
- [LB02] LUGSCHEIDER, E. ; BACH, Fr W.: *Fachbuchreihe Schweißtechnik*. Bd. 139: *Handbuch der thermischen Spritztechnik: Technologien - Werkstoffe - Fertigung*. Düsseldorf : Verl. für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl., 2002. – ISBN 3871551864
- [LDV03] LIAO, H. ; DENG, H. ; VERDY, C.: Determination of the Moving Velocity of Preheating Gun During Preheating/Spraying/Cooling Process by a Function Specification Method. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2003: Advancing the Science Applying the Technology*. Orlando FL USA, 2003, S. 633–640
- [Lei01] LEISTNER, E.: *Fachbuchreihe Schweißtechnik*. Bd. 146: *Gefügeatlas zur Präparation und Auswertung thermischer Spritzschichten*. Düsseldorf : Verl.

für Schweißen und Verwandte Verfahren DVS-Verl., 2001. – ISBN 387155197X

- [Ler81] LERNER, E. J.: Computer-aided manufacturing. In: *IEEE Spectrum* (1981), Nr. 18, S. 34–39
- [LJC07] LIN, B. T. ; JEAN, M. D. ; CHOU, J. H.: Using response surface methodology for optimizing deposited partially stabilized zirconia in plasma spraying. In: *Applied Surface Science* 253 (2007), Nr. 6, S. 3254–3262
- [LLW03] LI, C. J. ; LI, W. Y. ; WANG, Y. Y.: Effect of Spray Angle on Deposition Characteristics in Cold Spraying. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2003: Advancing the Science Applying the Technology*. Orlando FL USA, 2003, S. 91–96
- [LLW05] LI, C. J. ; LI, C. X. ; WANG, M.: Effect of spray parameters on the electrical conductivity of plasma-sprayed $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ coating for the cathode of SOFCs. In: *Surface & Coatings Technology* (2005), Nr. 198, S. 278–282
- [Lon04a] LONG, F. N.: Introduction to Processing and Design. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 105–107
- [Lon04b] LONGO, F. N.: Coating Operations. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 120–127
- [Lon04c] LONGO, F. N.: Coating Processing. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 108–119
- [Lon04d] LONGO, F. N.: Postcoating Operations. In: DAVIS, J. R. (Hrsg.): *Handbook of thermal spray technology*. Materials Park, Ohio : ASM International, 2004. – ISBN 9780871707956, S. 128–132
- [LSH89] LEWIS, T. ; SOKOL, L. ; HANNA, E.: Optimization of Gator-gard Applied Chromium Carbide - NCrAlY Composite Overlays for Maximum Solid Particle Erosion Resistance. In: *Thermal Spray, Adv. in Coating Tech.* (1989), S. 149–155

- [LVS05] LATZEL, S. ; VASSEN, R. ; STÖVER, D.: New environmental barrier coating system on carbon-fiber reinforced silicon carbide composites. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 14 (2005), Nr. 2, S. 268–272
- [LYS⁺00] LIH, W. C. ; YANG, S. H. ; SU, C. Y. ; HUANG, S. C. ; HSU, I. C. ; LEU, M. S.: Effects of process parameters on molten particle speed and surface temperature and the properties of HVOF CrC/NiCr coatings. In: *Surface and Coatings Technology* 133-134 (2000), S. 54–60
- [LZB⁺05] LIAO, H. L. ; ZHU, Y. L. ; BOLOT, R. ; CODDET, C. ; MA, S. N.: Size distribution of particles from individual wires and the effects of nozzle geometry in twin wire arc spraying. In: *Surface and Coatings Technology* 200 (2005), Nr. 7, S. 2123–2130
- [MCGAD03] MOSTAGHIMI, J. ; CHANDRA, S. ; GHAFOURI-AZAR, R. ; DOLATABADI, A.: Modeling thermal spray coating processes: a powerful tool in design and optimization. In: *Surface and Coatings Technology* 163-164 (2003), S. 1–11
- [MCS⁺94] MONTAVON, G. ; CODDET, C. ; SAMPATH, S. ; HERMAN, H. ; BERNDT, C. C.: Vacuum Plasma Spray Forming of Astroloy: an Investigation of Processing Parameters. In: *Thermal Spray Industrial Applications* (1994), S. 469–475
- [MDV98] MONTILLET, D. ; DOMBRE, E. ; VALENTIN, P.: Deposit Model for Offline Programming in a Spray Process. In: *Thermal Spray: Meeting the Challenges of the 21st Century, Proceedings of the 15th International Thermal Spray Conference 1998*. Nice : ASM International, 1998, S. 905–910
- [MG10] MING, S. ; GUANGCHAO, H.: The design & simulation of spatial path planning for the robotic plasma spraying. In: *International Conference on Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT)* 1 (2010), S. 755–757
- [MH92] MEYER, P. J. ; HAWLEY, D.: Electro-Plasma Inc. LPPS Production Systems. In: BERNECKI, T. (Hrsg.): *Thermal spray coatings: properties, processes, and applications*. Materials Park, Ohio : ASM International, 1992. – ISBN 0871704374, S. 29–38
- [MK65] MCGEARY, T. C. ; KOFFSKEY, J. M.: Engineering Applications for Flame Plating. In: *Met.Prog.* (1965), S. 80–86

- [MK10] MÜLLER, H. ; KOUT, A.: Bahnplanung in dynamischen Umgebungen. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-*. Dortmund : Praxiswissen, 2010, S. 141–162
- [MM10] MICRO-MEASUREMENTS ; VISHAY PRECISION GROUP (Hrsg.): *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method: Tech Note TN-503*. 2010
- [Moe97] MOELLER, F.: Keramische Schichten - Hinweise aus der Praxis. In: *Konstruktionspraxis* (1997), Nr. 10
- [Mor91] MORISCHITA, T.: Coatings by 250 kW Plasma Jet Spray Systems. In: *Plasma Technik 2nd Symposium, Vol. 1 Plasma Technik*. Wohlen, 1991, S. 137–145
- [MR05] MARPLE, B. R. ; ROGERIO, S. L.: Process Temperature/Velocity-Hardness-Wear Relationships for High-Velocity Oxyfuel Sprayed Nanostructured and Conventional Cermet Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 14 (2005), Nr. 1, S. 67–76
- [MSB⁺97] MONTAVON, G. ; SAMPATH, S. ; BERNDT, C. C. ; HERMAN, H. ; CODDET, C.: Effects of the spray angle on splat morphology during thermal spraying. In: *Surface & Coatings Technology* 91 (1997), Nr. 1-2, S. 107–115
- [Mue03] MUELLER, K. P.: Praktische Oberflächentechnik: Vorbehandeln, beschichten, Beschichtungsfehler, Umweltschutz : mit 72 Tabellen. In: *Praktische Oberflächentechnik, vorbehandeln, beschichten, Beschichtungsfehler, Umweltschutz : mit 72 Tabellen, Klaus-Peter Müller* (2003)
- [MW10] MÜLLER, H. ; WIEDERKEHR, T.: Geometrieverarbeitung für die virtuelle Realisierung produktionstechnischer Prozesse. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-*. Dortmund : Praxiswissen, 2010, S. 89–108
- [Nak94] NAKAGAWA, T.: Recent manufacturing technologies for auto-body panel forming tools. In: *Journal of Materials Processing Technology* 46 (1994), Nr. 3-4, S. 277–290

- [NG09] NEWBERY, A. ; GRANT, P.: Arc Sprayed Steel: Microstructure in Severe Substrate Features. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 18 (2009), Nr. 2, S. 256–271
- [NGN05] NEWBERY, A. P. ; GRANT, P. S. ; NEISER, R. A.: The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying. In: *Surface and Coatings Technology* 195 (2005), Nr. 1, S. 91–101
- [NOV10] NOVA SWISS: *Oberflächen-/ Beschichtungstechnik*. http://www.novaswiss.ch/webautor-data/10/0berflaechen_de_150dpi.pdf.
Version: 2010
- [OM68] OKADA, M. ; MARUO, H.: New plasma spraying and its application. In: *Br. Weld. J.* (1968), Nr. 15, S. 371
- [PAM04] POURMOUSA, A. ; ABEDINI, A. ; MOSTAGHIMI, J.: Particle Diagnostics in Wire-Arc Spraying System. In: *Thermal Spray Solutions: Advances in technology and application, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2004*. Osaka : DVS Media GmbH, 2004, S. 962–967
- [Paw08] PAWLOWSKI, L.: *The science and engineering of thermal spray coatings*. 2. ed. Chichester : Wiley, 2008. – ISBN 9780471490494
- [PDL⁺97] PLANCHE, M. P. ; DUAN, Z. ; LAGNOUX, O. ; HEBERLEIN, J. ; FAUCHAIS, P. ; PFENDER, E.: Study of arc fluctuations with different plasma spray torch configurations. In: *Proceedings of the 13th International Symposium of Plasma Chemistry* Bd. 3. Beijing, China, 1997, S. 1460–1465
- [PEDF92] PATEYRON, B. ; ELCHINGER, M. F. ; DELLUC, G. ; FAUCHAIS, P.: Thermodynamic and transport properties of Ar-H₂ and Ar-He plasma gases used for spraying at atmospheric pressure. I: Properties of the mixtures. In: *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 12 (1992), Nr. 4, S. 421–448
- [Pfe94] PFENDER, E.: Plasma jet behavior and modeling associated with the plasma spray process. In: *Thin Solid Films* 238 (1994), Nr. 2, S. 228–241
- [PFS91] PFENDER, E. ; FINCKE, J. ; SPORES, R.: Entrainment of cold gas into thermal plasma jets. In: *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 11 (1991), Nr. 4, S. 529–543

- [PKC08] PARK, S. H. ; KIM, H. J. ; CHO, J. I.: Optimal Central Composite Designs for Fitting Second Order Response Surface Linear Regression Models. In: *Recent Advances in Linear Models and Related Areas* (2008), S. 323–339
- [PLC04] PLANCHE, M. P. ; LIAO, H. ; CODDET, C.: Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions. In: *Surface and Coatings Technology* 182 (2004), Nr. 2-3, S. 215–226
- [PLCM03] PERSHIN, V. ; LUFITHA, M. ; CHANDRA, S. ; MOSTAGHIMI, J.: Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 12 (2003), Nr. 3, S. 370–376
- [PLG85] PUZRYAKOV, A. F. ; LEVITIN, S. A. ; GARANOV, V. A.: Effect of spraying angle on the properties of plasma-deposited coatings. In: *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* 24 (1985), Nr. 8, S. 631–633
- [PLLC03] PLANCHE, M. P. ; LAKAT, A. ; LIAO, H. ; CODDET, C.: Investigations of In-Flight Particle Characteristics Through DPV Measurements and Correlation With Impact Analysis and Coating Properties. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2003: Advancing the Science Applying the Technology*. Orlando FL USA, 2003, S. 1175–1182
- [PMAC05] POURMOUSA, A. ; MOSTAGHIMI, J. ; ABEDINI, A. ; CHANDRA, S.: Particle size distribution in a wire-arc spraying system. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 14 (2005), Nr. 4, S. 502–510
- [Pot05] POTTER, C.: Advanced high-stress steels for stamped automotive parts. In: *Metallforming* 3 (2005), S. 22–26
- [PPBC08] PIERLOT, C. ; PAWLOWSKI, L. ; BIGAN, M. ; CHAGNON, P.: Design of experiments in thermal spraying: A review. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (2008), Nr. 18, S. 4483–4490
- [PPT⁺07] PIERLOT, C. ; PAWLOWSKI, L. ; TOMASZEK, R. ; DYSHLOVENKO, S. ; BIGAN, M.: Interdependence of different properties of hydroxyapatite coatings and powders plasma sprayed into water. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 86 (2007), Nr. 2, S. 153–158

- [RA96] RAMABHADRAN, R. ; ANTONIO, J.: Planning Spatial Paths for Automated Spray Coating Applications. In: *Proceedings of the 1996 IEEE, International Conference on Robotics and Automation*. Minnesota : IEEE International, 1996, S. 1255–1260
- [RA97] RAMABHADRAN, R. ; ANTONIO, J.: Fast Solution Techniques for a Class of Optimal Trajectory Planning Problems with Applications to Automated Spray Coating. In: *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 13 (1997), Nr. 4, S. 519–530
- [Rei10] REIS ROBOTICS GMBH: *ProSim*. http://www.reisrobotics.de/reisrobotics_media/Downloads/PDF/infothek/03_flyer/prosim/prosim_d-p-1264.pdf. Version: 2010
- [RJ89] RAMMATH, V. ; JAYARAMAN, N.: Characterisation and wear performance of plasma sprayed WC-Co coatings. In: *Materials science and technology* (1989), Nr. 5, S. 382
- [RNY03] REMESH, K. ; NG, H. ; YU, S.: Influence of process parameters on the deposition footprint in plasma-spray coating. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 12 (2003), Nr. 3, S. 377–392
- [RVVF89] ROUMILHAC, P. ; VARDELLE, M. ; VARDELLE, A. ; FAUCHAIS, P.: Comparison of Heat Momentum Transfer to Ceramic Particles Sprayed Ar-H₂ and Ar-He Plasma Jets at Atmospheric Pressure. In: *Plasma Spray Technology: New Ideas and Processes* (1989), S. 111–117
- [RYNB03] REMESH, K. ; YU, S. ; NG, H. ; BERNDT, C.: Computational study and experimental comparison of the in-flight particle behavior for an external injection plasma spray process. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 12 (2003), Nr. 4, S. 508–522
- [SALK08] SONG, E. P. ; AHN, J. ; LEE, S. ; KIM, N. J.: Effects of critical plasma spray parameter and spray distance on wear resistance of Al₂O₃-8 wt.%TiO₂ coatings plasma-sprayed with nanopowders. In: *Surface and Coatings Technology* 202 (2008), Nr. 15, S. 3625–3632
- [San08] SANDVIK HARD MATERIALS: *All about cemented carbide*. <http://www.allaboutcementedcarbide.com/>. Version: 2008

- [Sar05] SARIKAYA, O.: Effect of some parameters on microstructure and hardness of alumina coatings prepared by the air plasma spraying process. In: *Surface and Coatings Technology* 190 (2005), Nr. 2-3, S. 388–393
- [Sch91] SCHREIBER, R. R.: Portrait of a Painting Robot. In: *Manuf. Eng.* 107 (1991), Nr. 5, S. 55–61
- [Sch01] SCHOOP, M.: Early thermal spray application— JTST historical patent 21. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 10 (2001), Nr. 1, S. 35–36
- [Sch04] SCHREIBER, F.: Carbidische Werkstoffe zum Thermischen Spritzen. In: *Tagungsband zum 7. Werkstofftechnischen Kolloquium* Bd. 7. Chemnitz, 2004
- [SDW90] STEFFENS, H. D. ; DVORAK, M. ; WEWEL, M.: Einfluss der Prozessparameter beim Lichtbogenspritzen. Ein Leitfaden für den Praktiker. In: *Thermische Spritzkonferenz*. Düsseldorf : DVS Media GmbH, 1990, S. 23–26
- [SE08] SCHLEINING, H. ; ESSERT, E.: *Untersuchung der Korrelation zwischen Prozessparametern, Partikelcharakteristika und Schichteigenschaften beim Lichtbogenspritzen: Projektarbeit*. Technische Universität Dortmund, 2008
- [SFH⁺05] STEINBECK, G. ; FRITZSCHE, C. ; HOFFMANN, O. ; PICHLER, A. ; KOTZSCHMAR, S. A. ; RICHTER, A.: Heutige und zukünftige Stahllösungen für Karosserien. In: *MP Materialprüfung* 47 (2005), Nr. 11-12, S. 642–649
- [SG97] SOBOLEV, V. ; GUILMANY, J. M.: Effect of droplet impact angle on flattening of splat in thermal spraying. In: *Materials Letters* 32 (1997), Nr. 2-3, S. 197–201
- [SG98] SOBOLEV, V. V. ; GUILMANY, J. M.: Influence of droplet impact angle on droplet-substrate mechanical interaction in thermal spraying. In: *Materials Letters* 33 (1998), Nr. 5-6, S. 315–319
- [SGGRS98] SEELINGER, M. ; GONZALEZ-GALVAN, E. ; ROBINSON, M. ; SKAAR, S.: Towards a robotic plasma spraying operation using vision. In: *Robotics & Automation Magazine, IEEE* 5 (1998), Nr. 4, S. 33–38, 49
- [SGK06] SCHMIDT, T. ; GAERTNER, F. ; KREYE, H.: New developments in cold spray based on higher gas and particle temperatures. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 15 (2006), Nr. 4, S. 488–494

- [SH09] SACHS, L. ; HEDDERICH, J.: *Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R*. 13., aktualisierte und erw. Aufl. Dordrecht : Springer, 2009. – ISBN 9783540889014
- [Shr95] SHREIR, L. L.: *Corrosion*. Bd. 2: *Corrosion control*. 3. ed., reprint. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1995. – ISBN 0750610778
- [SJ01] SAMPATH, S. ; JIANG, X.: Splat formation and microstructure development during plasma spraying: deposition temperature effects. In: *Materials Science and Engineering A* 304-306 (2001), S. 144–150
- [SJK⁺03] SAMPATH, S. ; JIANG, X. ; KULKARNI, A. ; MATEJICEK, J. ; GILMORE, D. L. ; NEISER, R. A.: Development of process maps for plasma spray: case study for molybdenum. In: *Materials Science and Engineering A* 348 (2003), Nr. 1-2, S. 54–66
- [SJM⁺99] SAMPATH, S. ; JIANG, X. Y. ; MATEJICEK, J. ; LEGER, A. C. ; VARDELLE, A.: Substrate temperature effects on splat formation, microstructure development and properties of plasma sprayed coatings Part I: Case study for partially stabilized zirconia. In: *Materials Science and Engineering A* 272 (1999), Nr. 1, S. 181–188
- [SLBSS⁺06] SANTANA, Y. Y. ; LA BARBERA-SOSA, J. G. ; STAIA, M. H. ; LESAGE, J. ; PUCHI-CABRERA, E. S. ; CHICOT, D. ; BEMPORAD, E.: Measurement of residual stress in thermal spray coatings by the incremental hole drilling method. In: *Surface and Coatings Technology* 201 (2006), Nr. 5, S. 2092–2098
- [SN91] SMITH, R. W. ; NOVAK, R.: Advances and Applications in US Thermal Spray Technology. I. Technology and Materials. In: *Powder Metallurgy International* 23 (1991), Nr. 3, S. 147–155
- [SN94] SMITH, M. F. ; NEISER, R. A. Dykhuizen R. C.: An Investigation of the Effects of Droplet Impact Angle in Thermal Spray Deposition. In: *Proceedings of the 7th National Thermal Spray Conference*. Boston, 1994, S. 603–608
- [SRC⁺00] STAIA, M. H. ; RAMOS, E. ; CARRASQUERO, A. ; ROMAN, A. ; LESAGE, J. ; CHICOT, D. ; MESMACQUE, G.: Effect of substrate roughness induced by grit blasting upon adhesion of WC-17% Co thermal sprayed coatings. In: *Thin Solid Films* 377-378 (2000), S. 657–664

- [SRR01] STROCK, E. ; RUGGIERO, P. ; REYNOLDS, D.: The Effect of Off-Angle Spraying on the Structure and Properties of HVOF WC/CoCr Coatings. In: BERNDT, C. C. (Hrsg.) ; KHOR, K. A. (Hrsg.) ; LUGSCHEIDER, E. (Hrsg.): *Thermal spray 2001: New surfaces for a new millenium; proceedings of the 2nd International Thermal Spray Conference*. Singapur : ASM International, 2001, S. 671–676
- [SSM00] STEWART, D. A. ; SHIPWAY, P. H. ; MCCARTNEY, D. G.: Microstructural evolution in thermally sprayed WC-Co coatings: comparison between nanocomposite and conventional starting powders. In: *Acta Materialia* 48 (2000), Nr. 7, S. 1593–1604
- [SSR⁺00] SARAVANAN, P. ; SELVARAJAN, V. ; RAO, D. S. ; JOSHI, S. V. ; SUNDARARAJAN, G.: Application of Taguchi Method to the Optimization of Detonation Spraying Process. In: *Materials and Manufacturing Processes* 15 (2000), Nr. 1, S. 139–153
- [SSS86] SUBRAHMANYAM, J. ; SRIVASTAVA, M. P. ; SIVAKUMAR, R.: Characterization of Plasma Sprayed WC-Co Coatings. In: *Mater. Sci. Eng.* (1986), Nr. 84, S. 209–214
- [SSS⁺00] SARAVANAN, P. ; SELVARAJAN, V. ; SRIVASTAVA, M. ; RAO, D. ; JOSHI, S. ; SUNDARARAJAN, G.: Study of plasma- and detonation gun-sprayed alumina coatings using taguchi experimental design. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 9 (2000), Nr. 4, S. 505–512
- [Ste92] STEFFENS, H. D.: *Moderne Beschichtungsverfahren: [Vorträge eines Fortbildungsseminars der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde e.V. (DGM)]*. Oberursel : DGM Informationsges., 1992. – ISBN 3883551775
- [Ste05] STEUER, D.: *Statistische Eigenschaften der Multikriteriellen Optimierung mittels Wünschbarkeiten*. Dortmund, Technische Universität Dortmund, Diss., 2005
- [STM01] SAVARIMUTHU, A. C. ; TABER, H. F. ; MEGAT, I.: Sliding Wear Behavior of Tungsten Carbide Thermal Spray Coatings for Replacement of Chromium Electroplate in Aircraft Applications. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 10 (2001), Nr. 3, S. 502–510
- [Sul05] SULZER METCO: *Thermisches Spritzen*. 3. 2005

- [TBM16] TOMA, D. ; BRANDL, W. ; MARGINEAN, G.: Wear and corrosion behaviour of thermally sprayed cermet coatings. In: *Surface and Coatings Technology* 138 (2001/4/16/), Nr. 2-3, S. 149–158
- [Til07] TILLMANN, W. (Hrsg.): *3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-: Berichtsband 2007*. Dortmund : Praxiswissen, 2007
- [Til09] TILLMANN, W. (Hrsg.): *Sonderforschungsbereich 708, 3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-*. Dortmund : Praxiswissen, 2009
- [Til10] TILLMANN, W. (Hrsg.): *3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-: Berichtsband 2007-2010*. Dortmund : Praxiswissen, 2010
- [TKV⁺10] TILLMANN, W. ; KUHLENKÖTTER, B. ; VOGLI, E. ; BAUMANN, I. ; SCHEELE, C. ; KREBS, B.: Robotergestützte, endkonturnahe Beschichtung komplexer Oberflächen mit thermisch gespritzten WC-basierten Verschleißschutzschichten. In: *Thermal Spray Bulletin* 3 (2010), Nr. 1, S. 44–53
- [TMC05a] TRIFA, F. I. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C.: Integrating a deposition model for off-line spray tools programming. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2005*. Basel : DVS Media GmbH, 2005, S. 280–285
- [TMC05b] TRIFA, F. I. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C.: On the relationships between the geometric processing parameters of APS and the Al₂O₃-TiO₂ deposit shapes. In: *Surface and Coatings Technology* 195 (2005), Nr. 1, S. 54–69
- [TMC⁺05c] TRIFA, F. I. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C. ; NARDIN, P. ; ABRUDEANU, M.: Geometrical features of plasma-sprayed deposits and their characterization methods. In: *Materials Characterization* 54 (2005), Nr. 2, S. 157–175
- [TMC07] TRIFA, F. I. ; MONTAVON, G. ; CODDET, C.: Model-Based Expert System for Design and Simulation of APS Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 16 (2007), Nr. 1, S. 128–139
- [TNL10] TILLMANN, W. ; NEBEL, J. ; LUO, W.: Wechselwirkung Werkzeug-Werkstück. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *3D-Surface Engineering für*

Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-. Dortmund : Praxiswissen, 2010, S. 205–220

- [TP88] TUCKER, R. C. ; PRICE, M. O.: The Effect of Angle of Deposition on the Properties of Selected Detonation Gun Coatings. In: *Proceedings of AT-TAC '88*. Osaka, 1988, S. 61–71
- [TR92] THORPE, M. L. ; RICHTER, H. J.: A pragmatic analysis and comparison of HVOF processes. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 1 (1992), Nr. 2, S. 161–170
- [TVA07] TILLMANN, W. ; VOGLI, E. ; ABDULGADER, M.: Influence of Atomisation Gas on the Particle Formation during Arc Spraying with Cored Wires. In: *Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2007*. Peking, China : ASM International, 2007
- [TVA08a] TILLMANN, W. ; VOGLI, E. ; ABDULGADER, M.: Asymmetric Melting Behavior in Twin Wire Arc Spraying with Cored Wires. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 17 (2008), Nr. 5, S. 974–982
- [TVA⁺08b] TILLMANN, W. ; VOGLI, E. ; ABDULGADER, M. ; GURRIS, M. ; KUZMIN, D. ; TUREK, S.: Particle Behavior During the Arc Spraying Process with Cored Wires. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 17 (2008), Nr. 5, S. 966–973
- [TVB⁺08] TILLMANN, W. ; VOGLI, E. ; BAUMANN, I. ; MATTHAEUS, G. ; OSTROWSKI, T.: Influence of the HVOF Gas Composition on the Thermal Spraying of WC-Co Submicron Powders to Produce Superfine Structured Cermet Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 17 (2008), Nr. 5, S. 924–932
- [TVB⁺10] TILLMANN, W. ; VOGLI, E. ; BAUMANN, I. ; KOPP, G. ; WEIHS, C.: Desirability-Based Multi-Criteria Optimization of HVOF Spray Experiments to Manufacture Fine Structured Wear-Resistant 75Cr3C2-25(NiCr20) Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 19 (2010), Nr. 1, S. 392–408
- [TVF05] TRICOIRE, A. ; VARDELLE, M. ; FAUCHAIS, P.: New concepts for plasma sprayed zirconia TBCs for aeronautical applications. In: *Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2005*. Basel : DVS Media GmbH, 2005, S. 924–928

- [TVN09] TILLMANN, W. ; VOGLI, E. ; NEBEL, J.: Einfluss der Spritzparameter auf die mechanischen und tribologischen Eigenschaften von lichtbogenge-spritzten WSC-FeCSiMn Schichten. In: TILLMANN, W. (Hrsg.): *Sonderfor-schungsbereich 708, 3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blech-formteilefertigung -Erzeugung, Modellierung, Bearbeitung-* Bd. 3. Dortmund : Praxiswissen, 2009, S. 141–152
- [VKE94] VIVEKANANDHAN, T. ; KASHANI, A. ; ECHEMPATI, R.: Computer-aided torch trajectory generation for automated coating of parts with complex surfaces. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 3 (1994), Nr. 2, S. 208–215
- [VKJ92] VIVEKANANDHAN, T. ; KASHANI, R. A. ; JOHNSON, W. A.: Intelligent Plasma Torch Trajectory Generation for Thermal Spraying of Parts with Complex Geometry. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Thermal Spraying*. Orlando : ASM International, 1992, S. 217–220
- [VL98] VILLIERS LOVELOCK, H. de: Powder/processing/structure relationships in WC-Co thermal spray coatings: A review of the published literature. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 7 (1998), Nr. 3, S. 357–373
- [VN07] VUORISTO, P. ; NYLÉN, P.: Industrial and Research Activities in Thermal Spray Technology in the Nordic Region of Europe. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 16 (2007), Nr. 4, S. 466–471
- [VSY⁺09] VIJAY, M. ; SELVARAJAN, V. ; YUGESWARAN, S. ; ANANTHAPAD-MANABHAN, P. V. ; SREEKUMAR, K. P.: Effect of Spraying Parameters on Deposition Efficiency and Wear Behavior of Plasma Sprayed Alumina-Titania Composite Coatings. In: *Plasma Science and Technology* 11 (2009), Nr. 6, S. 666
- [VVF93] VARDELLE, M. ; VARDELLE, A. ; FAUCHAIS, P.: Spray parameters and particle behavior relationships during plasma spraying. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 2 (1993), Nr. 1, S. 79–91
- [VVFS94] VARDELLE, M. ; VARDELLE, A. ; FANCHAIS, P. ; SARAY, I.: Comparison of Classical and Axial Injection Torches for Spraying Alumina Coatings. In: *Materials and Manufacturing Processes* 9 (1994), Nr. 4, S. 735–755
- [VVZ⁺02] VARDELLE, A. ; VARDELLE, M. ; ZHANG, H. ; THEMELIS, N. ; GROSS, K.: Volatilization of metal powders in plasma sprays. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 11 (2002), Nr. 2, S. 244–252

- [VWS94] VARACALLE, D. J. ; WILSON, G. C. ; STEEPER, T. J.: Optimizing APS Ceramic Coatings Using Response Surface Methods. In: *Proceedings of the 1994 International IEEE Conference on Robotics and Automation*. San Diego : IEEE International, 1994, S. 593–600
- [Wag02] WAGENKNECHT, T.: *Untersuchungen zum Flammsspritzen von Polyethylen für den Korrosionsschutz*. Hall-Wittenberg, Martin-Luther Universität, Diss., 2002
- [WB92] WEWEL, M. ; BABIAK, Z.: Lichtbogenspritzen: Verfahren und Anwendung. In: *Moderne Beschichtungsverfahren*. Dortmund : DGM Informationsges., 1992, S. 71–85
- [WBJ04] WILDEN, J. ; BERGMANN, J. P. ; JAHN, S.: Einfluss der Strom-Spannungs-Charakteristik auf die Schichtbildung und -eigenschaften beim Lichtbogenspritzen. In: *Tagungsband zum 7. Werkstofftechnischen Kolloquium*. Chemnitz, 2004, S. 95–100
- [WBJ08] WILDEN, J. ; BERGMANN, J. P. ; JAHN, S.: Investigation about the Chrome Steel Wire Arc Spray Process and the Resulting Coating Properties. In: *Thermal Spray Crossing Borders, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition 2008*. Maastricht : Springer-Verlag GmbH, 2008, S. 319–323
- [WD06] WITT, G. ; DÜRR, H.: *Taschenbuch der Fertigungstechnik: Mit zahlreichen Tabellen*. München : Fachbuchverl. Leipzig Hanser, 2006. – ISBN 3446225404
- [Wei07] WEISS, C.: *Datenanalyse und Modellierung mit STATISTICA*. München : Oldenbourg, 2007. – ISBN 3486579592
- [WGP⁺90] WEISS, L. E. ; GURSOZ, E. L. ; PRINZ, F. B. ; FUSSELL, P. S. ; MAHALINGAM, S.: A Rapid Tool Manufacturing System Based on Stereolithography and Thermal Spraying. In: *ASME Manufacturing Review* 3 (1990), Nr. 1
- [WHPG95] WANG, X. ; HEBERLEIN, J. ; PFENDER, E. ; GERBERICH, W.: Enhancement of Coating Uniformity with Secondary Gas Atomization in Wire Arc Spray. In: *Proceedings of the International Symposium on Plasma Chemistry 12*. Minneapolis, USA, 1995, S. 907–913

- [WHPG96] WANG, X. ; HEBERLEIN, J. ; PFENDER, E. ; GERBERICH, W.: Effect of gas velocity and particle velocity on coating adhesion in wire arc spraying. In: *Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 1996*. Cincinnati : ASM International, 1996, S. 807–811
- [WHPG99] WANG, X. ; HEBERLEIN, J. ; PFENDER, E. ; GERBERICH, W.: Effect of nozzle configuration, gas pressure, and gas type on coating properties in wire arc spray. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 8 (1999), Nr. 4, S. 565–575
- [WIL10] WONG, W. ; IRISSOU, E. ; LEGOUX, J. G.: Influence of helium and nitrogen gases on the properties of cold gas dynamic sprayed pure titanium coatings. In: *Thermal Spray: Global solutions for future applications, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2010*. Singapur : DVS Media GmbH, 2010
- [WJG99] WEIHS, C. ; JESSENBERGER, J. ; GRIZE, Y. L.: *Statistische Methoden zur Qualitätssicherung und -optimierung in der Industrie*. Weinheim : Wiley-VCH, 1999. – ISBN 3527296174
- [WJR⁺08] WILDEN, J. ; JAHN, S. ; REICH, S. ; FISCHER, G. ; KNAPP, S. ; RODIJNEN, F. van: Wire Arc Spraying Technology for Spraying Particle Reinforced Coatings. In: *Thermal Spray Crossing Borders, Proceedings of the International Thermal Spray Conference & Exposition 2008*. Maastricht : Springer-Verlag GmbH, 2008, S. 297–301
- [WK92] WANG, Y. ; KETTUNEN, P.: The Optimization of Spraying Parameters for WC-Co Coatings by Plasma and Detonation-Gun Spraying. In: *Thermal Spray: International Advances in Coatings Technology* (1992), S. 575–580
- [WLLY10] WANG, X. M. ; LI, C. J. ; LI, C. X. ; YANG, G. J.: Microstructure and Electrochemical Behavior of a Structured Electrolyte/LSM-Cathode Interface Modified by Flame Spraying for Solid Oxide Fuel Cell Application. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 19 (2010), Nr. 1, S. 311–316
- [WLW06] WANG, W. Z. ; LI, C. J. ; WANG, Y. Y.: Effect of Spray Distance on the Mechanical Properties of Plasma Sprayed Ni-45Cr Coatings. In: *Materials Transactions* 47 (2006), Nr. 7, S. 1–6
- [WPA92] WEISS, L. E. ; PRINZ, F. ; ADAMS, D.: Solid Freeform Fabrication by Thermal Spray Shape Deposition. In: *Proceedings of the 13th Internatio-*

nal Conference on Thermal Spraying. Orlando : ASM International, 1992, S. 847–851

- [WSN02] WATANABE, T. ; SATO, T. ; NEZU, A.: Electrode phenomena investigation of wire arc spraying for preparation of Ti-Al intermetallic compounds. In: *Thin Solid Films* 407 (2002), Nr. 1-2, S. 98–103
- [WWPH98] WATANABE, T. ; WANG, X. ; PFENDER, E. ; HEBERLEIN, J.: Correlations between electrode phenomena and coating properties in wire arc spraying. In: *Thin Solid Films* 316 (1998), Nr. 1-2, S. 169–173
- [XZWY09] XIA, W. ; ZHANG, H. ; WANG, G. ; YANG, Y.: A novel integrated temperature investigation approach of sprayed coatings during APS process. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), Nr. 6, S. 2897–2906
- [YWCW95] YANG, C. Y. ; WANG, B. C. ; CHANG, E. ; WU, J. D.: The influences of plasma spraying parameters on the characteristics of hydroxyapatite coatings: a quantitative study. In: *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 6 (1995), Nr. 5, S. 249–257
- [ZG88] ZHUANG, H. ; GU, C.: A study on residual stress of ZrO₂-MgO₂ Plasma sprayed coating. In: *Thermal Spray: Advances in Coatings Technology*. ASM International, 1988, S. 277–284
- [ZS01] ZAGORSKI, A. V. ; STADELMAIER, F.: Full-scale modelling of a thermal spray process. In: *Surface and Coatings Technology* 146-147 (2001), S. 162–167
- [ZS04] ZIERIS, R. ; SCHMIDT, A.: Off-line programming for spraying and laser cladding of three-dimensional surfaces. In: *Thermal Spray Solutions: Advances in technology and application, Proceedings of the International Thermal Spray Conference 2004*. Osaka : DVS Media GmbH, 2004
- [ZXW⁺08] ZHANG, H. ; XIA, W. ; WANG, G. ; YANG, Y. ; ZOU, Y.: An Integrated Investigation Approach for Coating Temperature Measurement and Control During Plasma Spraying. In: *Journal of Thermal Spray Technology* 17 (2008), Nr. 2, S. 263–274

Anhang

Quadratische Regressionsmodelle zur Vorhersage von Schichteigenschaften des atmosphärisch plasmagespritzten Schichtsystems WC-12Co

$$\begin{aligned} \text{Auftragsrate } [\mu\text{m}/\text{Ueberlauf}] = & (16,80 \pm 0,62) + (0,30 \pm 0,27) A + (-0,35 \pm \\ & 0,25) A^2 + (0,61 \pm 0,27) G + (-0,38 \pm 0,25) G^2 + (4,81 \pm 0,27) P + (0,09 \pm 0,25) P^2 + \\ & (-0,08 \pm 0,25) S + (-0,11 \pm 0,25) S^2 + (-0,08 \pm 0,33) AG + (-0,05 \pm 0,33) AP + \\ & (-0,01 \pm 0,33) AS + (0,13 \pm 0,33) GP + (-0,59 \pm 0,33) GS + (0,16 \pm 0,33) PS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Porosität } [\%] = & (4,93 \pm 0,93) + (0,04 \pm 0,40) A + (0,59 \pm 0,38) A^2 + (-1,81 \pm \\ & 0,40) G + (0,57 \pm 0,38) G^2 + (-0,13 \pm 0,40) P + (0,10 \pm 0,38) P^2 + (-0,04 \pm \\ & 0,40) S + (-0,08 \pm 0,38) S^2 + (-0,50 \pm 0,50) AG + (-0,27 \pm 0,50) AP + (-0,29 \pm \\ & 0,50) AS + (-0,84 \pm 0,50) GP + (0,89 \pm 0,50) GS + (-0,30 \pm 0,50) PS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rauheit } R_z [\%] = & (38,81 \pm 0,81) + (1,67 \pm 0,35) A + (0,12 \pm 0,33) A^2 + (3,10 \pm \\ & 0,35) G + (-0,35 \pm 0,33) G^2 + (0,42 \pm 0,35) P + (-0,76 \pm 0,33) P^2 + (0,36 \pm \\ & 0,34) S + (-0,74 \pm 0,33) S^2 + (-0,77 \pm 0,43) AG + (-0,55 \pm 0,43) AP + (-0,39 \pm \\ & 0,43) AS + (-0,72 \pm 0,43) GP + (-0,53 \pm 0,43) GS + (-0,17 \pm 0,43) PS \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Mikrohärte } [HV_{0,1}] = & \\ & (1245,32 \pm 78,18) + (-30,19 \pm 33,47) A + (-44,97 \pm 32,02) A^2 + (-41,54 \pm \\ & 33,47) G + (-75,04 \pm 32,02) G^2 + (38,58 \pm 33,47) P + (-1,90 \pm 32,01) P^2 + (17,43 \pm \\ & 33,47) S + (-42,12 \pm 32,01) S^2 + (136,24 \pm 41,91) AG + (-57,50 \pm 41,91) AP + \\ & (18,11 \pm 41,92) AS + (-86,41 \pm 41,91) GP + (17,23 \pm 41,91) GS + (-93,44 \pm 41,91) PS \end{aligned}$$

Kleinlasthärte [$HV_{0,5}$] =

$$(903,56 \pm 50,68) + (4,70 \pm 21,70) A + (-10,10 \pm 20,75) A^2 + (57,87 \pm 21,70) G + (-43,21 \pm 20,75) G^2 + (40,91 \pm 21,70) P + (-23,81 \pm 20,75) P^2 + (16,76 \pm 21,70) S + (-47,42 \pm 20,75) S^2 + (-23,28 \pm 27,17) AG + (-18,80 \pm 20,17) AP + (-20,77 \pm 27,17) AS + (14,27 \pm 27,17) GP + (-30,74 \pm 27,17) GS + (-17,30 \pm 27,17) PS$$

Haftzugfestigkeit [Mpa] = $(55,18 \pm 3,06) + (2,64 \pm 1,31) A + (0,67 \pm 1,25) A^2 + (0,82 \pm 1,31) G + (0,91 \pm 1,25) G^2 + (-7,84 \pm 1,31) P + (0,23 \pm 1,25) P^2 + (0,57 \pm 1,31) S + (0,99 \pm 1,25) S^2 + (1,54 \pm 1,64) AG + (-3,11 \pm 1,64) AP + (-1,40 \pm 1,64) AS + (1,19 \pm 1,64) GP + (-1,01 \pm 1,64) GS + (1,22 \pm 1,64) PS$

Spannung (200 μ m) [Mpa] = $(28,50 \pm 5,61) + (-4,12 \pm 2,40) A + (-0,13 \pm 2,30) A^2 + (10,45 \pm 2,40) G + (4,24 \pm 2,30) G^2 + (3,04 \pm 2,40) P + (6,12 \pm 2,30) P^2 + (1,71 \pm 2,40) S + (1,99 \pm 2,30) S^2 + (3,43 \pm 3,00) AG + (8,68 \pm 3,00) AP + (-2,43 \pm 3,00) AS + (5,19 \pm 3,00) GP + (-4,19 \pm 3,00) GS + (1,55 \pm 3,00) PS$

Partikelgeschwindigkeit [m/s] =

$$(197,91 \pm 1,44) + (-0,18 \pm 0,62) A + (0,26 \pm 0,59) A^2 + (5,04 \pm 0,62) G + (-1,50 \pm 0,59) G^2 + (-1,57 \pm 0,62) P + (1,33 \pm 0,59) P^2 + (-3,50 \pm 0,62) S + (-2,00 \pm 0,59) S^2 + (-0,48 \pm 0,77) AG + (0,14 \pm 0,77) AP + (-0,02 \pm 0,77) AS + (-0,06 \pm 0,77) GP + (0,42 \pm 0,77) GS + (0,30 \pm 0,77) PS$$

Partikeltemperatur [°C] = $(2352,03 \pm 15,80) + (-9,30 \pm 6,76) A + (2,57 \pm 6,47) A^2 + (63,70 \pm 6,76) G + (-0,96 \pm 6,47) G^2 + (-40,83 \pm 6,76) P + (2,29 \pm 6,47) P^2 + (-112,79 \pm 6,76) S + (67,05 \pm 6,47) S^2 + (18,72 \pm 8,47) AG + (-0,23 \pm 8,47) AP + (-5,20 \pm 8,47) AS + (-31,25 \pm 8,47) GP + (-19,61 \pm 8,47) GS + (20,93 \pm 8,47) PS$

Anteil geschmolzener Karbide [%] = $(64,88 \pm 6,66) + (-3,58 \pm 2,85) A + (-0,04 \pm 2,73) A^2 + (-15,82 \pm 2,85) G + (-0,50 \pm 2,73) G^2 + (0,25 \pm 2,85) P + (-1,37 \pm 2,73) P^2 + (3,59 \pm 2,85) S + (0,64 \pm 2,73) S^2 + (-1,34 \pm 3,57) AG + (1,26 \pm 3,57) AP + (2,15 \pm 3,57) AS + (-2,93 \pm 3,57) GP + (3,46 \pm 3,57) GS + (-5,15 \pm 3,57) PS$

Nomenklatur:

A: Ar/H_2 P: Pulverförderrate [g/min]

G: Gasdurchsatz [l/min] S: Spritzabstand [mm]

Versuchsnummer	Verhältnis Ar/H_2	Gasdurchsatz [l/min]	Pulverförrerate [g/min]	Spritzabstand [mm]
1	8	62	27	110
2	8	62	27	150
3	8	62	47	110
4	8	62	47	150
5	8	82	27	110
6	8	82	27	150
7	8	82	47	110
8	8	82	47	150
9	10	62	27	110
10	10	62	27	150
11	10	62	47	110
12	10	62	47	150
13	10	82	27	110
14	10	82	27	150
15	10	82	47	110
16	10	82	47	150
17	7	72	37	130
18	11	72	37	130
19	9	52	37	130
20	9	92	37	130
21	9	72	17	130
22	9	72	57	130
23	9	72	37	90
24	9	72	37	170
25 (c)	9	72	37	130
26 (c)	9	72	37	130
27 (c)	9	72	37	130
28 (c)	9	72	37	130
29 (c)	9	72	37	130
30 (c)	9	72	37	130

Tabelle 8.1: Central Composite Design mit 24 Läufen und 6 Centerpoints (c) zur Abschätzung des Fehler. Eingesetzt zur Optimierung des atmosphärisch plasmaspritzten Schichtsystems WC-12Co

Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Benjamin Krebs
Geburtsdatum: 22.01.1979
Geburtsort: Essen
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch

Studium:

10/2002 - 04/2006 Diplomstudiengang Physikingenieur, Universität Duisburg - Essen
11/2004 - 03/2005 Studienarbeit, Dortmunder OberflächenCentrum GmbH (DOC),
Thema: „Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit von Magnesiumfeinblechen mittels PVD - Bedampfung“
05/2006 - 09/2006 Diplomarbeit, Universität Duisburg - Essen, Arbeitsgruppe
Dünnschichttechnologie, Thema: „Herstellung und Analyse von $BaTiO_3$ -Dünnschichten für Kondensatoren“

Berufspraxis:

12/2005 - 04/2006 Studentische Hilfskraft, Universität Duisburg - Essen,
Fachbereich Physik, Arbeitsgruppe Dünnschichttechnologie
10/2006 - 01/2007 Wissenschaftliche Hilfskraft, Universität Duisburg - Essen,
Fachbereich Physik, Arbeitsgruppe Dünnschichttechnologie
02/2007 - heute Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Technische Universität
Dortmund, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie
01/2010 - heute Leiter der Arbeitsgruppe „Thermisches Spritzen“, Technische
Universität Dortmund, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie

Publikationsliste

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; BAUMANN, I.; KREBS, B.: Soldering of glass-steel hybrid structures for applications in the construction industry. In: *Proceedings of IURS'07*. 29. - 30.11.2007, Japan, Hiroshima, 2007

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; KREBS, B.: Einfluss des Spritzwinkels auf Schichteigenschaften für das thermische Spritzen. In: *Konferenzband „10. Werkstofftechnisches Kolloquium“*. 27. - 28.09.2007, TU Chemnitz, S. 76-81

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; BAUMANN, I.; KREBS, B.: Novel densification and smoothing techniques of thermal sprayed layers. In: *Materials Science and Engineering, Key Engineering Materials*. 384 (2008), S. 117-123

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; BAUMANN, I.; KREBS, B.: Superfine Structured and Nanostructured Wear Resistant Coatings Produced by means of Thermal Spraying Process, In: *Proceedings of International Conference Advanced Processing of Novel Functional Materials 2008*. 23. - 25.01.2008, Dresden

TILLMANN, W., VOGLI, E., BAUMANN, I.; KREBS, B.: Three-Dimensional Surface Engineering of Forming Tools By Thermal Spraying. In: *Smart Processing Technology (SPT 07)*. 2008, Nr. 2, S. 33-36

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; BAUMANN, I.; KREBS, B.: Near-net-shape and dense wear resistant thermally sprayed Coatings. In: *Key Engineering Materials*. 384 (2008), S. 117-123

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; KREBS, B.: Influence of the spray angle on characteristics for atmospheric plasma sprayed hard material based coatings. In: *Proceedings of ITSC International Thermal Spray Conference*. 02. - 04.06.2008, Maastricht/NL

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; ABDULGADER, M.; KREBS, B.: Hard materials based coatings deposited by means of arc spraying. In: *Thermal Spray Bulletin*. 1 (2008), S. 55-63

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; FERREIRA DA CUNHA, A.; KREBS, B.: Tungsten carbide and chromium carbide based coatings manufactured by Atmospheric Plasma Spraying. In: *China Surface Engineering*. 21 (2008), Nr. 2, S. 1-6

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; KREBS, B.: Influence of the Spray Angle on the Characteristics of Atmospheric Plasma Sprayed Hard Material Based Coatings. In: *Journal of Thermal Spray Technology*. 17 (2008), Nr. 5, S. 948-955

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; ABDULGADER, M.; KREBS, B.: Einfluss von Spritzparametern auf Strahlform und Schichtbildung beim Lichtbogenspritzen. In: *Konferenzband „11. Werkstofftechnisches Kolloquium“*. 01. - 02.10.2008, TU Chemnitz, S. 31-37

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; KREBS, B.: Optimierung von thermisch gespritzten und verdichteten Verschleißschutzschichten mittels statistischer Versuchsplanung. In: *Tillmann, W. (Hg.): SFB 708 - 2. öffentliches Kolloquium. Dortmund: Praxiswissen (3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung, 2)*. 2008, S. 9-20

MÜLLER, H.; TILLMANN, W.; VOGLI, E.; WIEDERKEHR, T.; KREBS, B.: A Deposition Model for Wire Arc Spraying and Its Computationally Efficient Simulation. In: *Proceedings of ITSC International Thermal Spray Conference*. 04. - 07.05.2009, Las Vegas/USA

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; FRANZEN, V.; KREBS, B.: Densification of atmospheric plasma sprayed wear resistant coatings. In: *Proceedings of ITSC International Thermal Spray Conference*. 04. - 07.05.2009, Las Vegas/USA

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; KREBS, B.: Surface Engineering von atmosphärisch plasmaspritzten WC-12Co Schichten. In: *Tillmann, W. (Hg.): SFB 708 - 3. öffentliches Kolloquium. Dortmund: Praxiswissen (3D-Surface Engineering für Werkzeugsysteme der Blechformteilefertigung, 3)*. 2009, S.7-15

TILLMANN, W.,; VOGLI, E.; ZIMMERMANN, S.; ABDULGADER, M.; KREBS, B.: Supervision and Measuring of Particle Parameters during the Wire-Arc Spraying Process with the Diagnostics Systems Accuraspray-g3 and LDA (Laser-Doppler-Anemometry). In: *Journal of Thermal Spray Technology*. 19 (2009), Nr. 4, S. 745-755

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; NEBEL, J.,; BAUMANN, I.; KREBS, B.: Thermally sprayed wear-protective cermet coatings for forming tools. In: *Proceedings of 4th International Conference on Spray Deposition and Melt Atomization SDMA 2009*. 2009

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; KREBS, B.: Investigation of Atmospheric Plasma Sprayed Tungsten Carbide Cobalt Coatings using Statistical Design of Experiments, In: *Proceedings of ITSC International Thermal Spray Conference*. 03. - 05.05.2010, Singapur, 2010, S. 57-63

TILLMANN, W.; KUHLENKÖTTER, B.; VOGLI, E.; BAUMANN, I.; SCHEELE, C.; KREBS, B.: Robotergestützte, endkonturnahe Beschichtung komplexer Oberflächen mit thermisch gespritzten WC-basierten Verschleißschutzschichten. In: *Thermal Spray Bulletin*. 3 (2010), S. 44-53

TILLMANN, W.; VOGLI, E.; NEBEL, J.,; BAUMANN, I.; KREBS, B.; NEBEL, J.: Wear-protective cermet coatings for forming tools. Cermet-Schichten für den Verschleißschutz von Umformwerkzeugen. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 41 (2010), Nr. 7, S. 597-607

TILLMANN, W.; KREBS, B.: Influence of handling parameters on coating characteristics in order to produce near-net-shape wear resistant coatings. To be published in: *Proceedings of ITSC International Thermal Spray Conference*. 27. - 29.09.2011, Hamburg, 2011

TILLMANN, W.; KREBS, B.: Robotergestützte, konturgenaue Bauteilbeschichtung für den Verschleißschutz mittels Thermischer Spritzverfahren. To be published in: *Konferenzband „14. Werkstofftechnisches Kolloquium“*. 01. - 02.09.2011, TU Chemnitz, 2011