

# **Beschichtungskopf zum fünfachsigem Beschichten von Freiformflächen in Vertikalfräsmaschinen**

Von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule  
Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von  
Diplom Ingenieur Karl Hans Jakob Groll  
aus Landshut/Bayern

Berichter:           Universitätsprofessor Dr.-Ing. Christian Brecher  
                          Universitätsprofessor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.-Ing. E.h. Manfred Weck

Tag der mündlichen Prüfung: 12. Dezember 2006

# Inhalt

Content

<b>0</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>iv</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnisse.....</b>	<b>5</b>
2.1	Anwendung und wirtschaftlicher Bedarf .....	5
2.2	Versagensmechanismen bei Schmiedegeselen.....	7
2.3	Grundlagen der Laseroberflächenbehandlung .....	9
2.4	Anwendungen und Anlagentechnik der Beschichtungstechnologie .....	12
2.4.1	Anwendungen der Laser-Pulver-Beschichtungstechnologie .....	12
2.4.2	Düsenentwicklungen für die Pulverbeschichtung .....	13
2.4.3	Anlagentechnik und Systemkomponenten zum Laserbeschichten.....	15
2.5	Prozesskettenerläuterung zur Instandsetzung und Designänderung von Umformwerkzeugen .....	16
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung und Zielsetzung.....</b>	<b>19</b>
<b>4</b>	<b>Anforderungsprofil eines Beschichtungskopfs zur Bearbeitung von Umformwerkzeugen.....</b>	<b>21</b>
4.1	Maßnahmen zur Prozesskettenoptimierung.....	21
4.2	Einfluss des Bauteilspektrums und der Schadensarten/-lagen.....	26
4.3	Maschinenseitige Randbedingungen .....	31
4.4	Prozessseitige Randbedingungen.....	34
4.5	Zusammenfassung der Anforderungen an einen Beschichtungskopf .....	42
<b>5</b>	<b>Konzeption, Konstruktion und Realisierung des Beschichtungskopfs .....</b>	<b>44</b>
5.1	Kinematisches Antriebskonzepts.....	44
5.2	Implementierung des Lasers .....	45
5.3	Düsenkonzept und Spurbreitenvariation .....	48
5.4	Aufbau des Beschichtungskopfs .....	53
5.4.1	Beschichtungskopfaufnahme .....	54
5.4.2	Drehdurchführung und Laserintegration .....	55
5.4.3	Düsenkopf mit stufenloser Spurbreitenvariation .....	58

5.4.4	C-Achs-Antrieb .....	59
5.4.5	B-Achs-Antrieb .....	61
5.4.6	Schleifring zur Energie- und Signalübertragung .....	62
5.4.7	Umlenkspiegel zur Strahlführung .....	63
<b>6</b>	<b>Pulverförderung .....</b>	<b>65</b>
6.1	Pneumatische Förderung .....	65
6.1.1	Spezifikation des Trägergases .....	65
6.1.2	Spezifikation der Beschichtungspulver .....	66
6.2	Erläuterung des Pulverfördersystems .....	66
6.3	Analyse des pneumatischen Feststofftransports .....	68
6.3.1	Möglichkeiten der Partikelförderung .....	68
6.3.2	Partikelbewegung in der Gasströmung .....	70
6.3.3	Einfluss der Turbulenz auf die Partikelförderung .....	72
6.3.4	Konzentration der Pulverpartikel .....	73
6.4	Transportgesetz für die pneumatische Partikelförderung .....	76
6.4.1	Transportgesetz für horizontale Förderung .....	76
6.4.2	Transportgesetz für vertikale Förderung .....	80
6.5	Messbarkeit der Pulververteilung .....	81
6.6	Komponenten der Pulverförderstrecke .....	83
6.6.1	Drehdurchführung .....	84
6.6.2	Diffusor .....	90
6.6.3	Pulver-Gas-Düse .....	92
6.7	Qualifizierung des Pulvertransports .....	94
6.7.1	Versuchsaufbau und -durchführung .....	94
6.7.2	Erläuterung der Signalverläufe .....	96
6.7.3	Einfluss des Gasvolumenstroms .....	98
6.7.4	Einfluss des Pulvermassenstroms .....	100
6.7.5	Qualifizierung von Pulverablagerungen in der Drehdurchführung .....	102
6.7.6	Qualifizierung der Diffusoren .....	107

---

6.7.7	Pulververteilung innerhalb der Düsenzuleitungen .....	108
6.7.8	Einfluss der Pulverart auf die Pulverförderung und -verteilung.....	109
<b>7</b>	<b>Qualifizierung und Validierung des Beschichtungskopfs .....</b>	<b>111</b>
7.1	Qualifizierung des Strahlführungssystems .....	111
7.2	Untersuchung des Beschichtungskopfs .....	114
7.2.1	Qualifizierung der Dreistrahl Düse .....	114
7.2.2	Qualifizierung der stufenlosen Spurbreitenvariation .....	116
7.2.3	Einfluss der B-Achs-Stellung auf die Beschichtungsspurgeometrie .....	117
7.2.4	Einfluss der Bewegungsführung auf die Beschichtungsspur .....	119
7.2.5	Beschichtung eines Demonstratorbauteils und eines Schmiedewerkzeugs	122
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>126</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>131</b>