

# **Herstellung von Randschichten auf Aluminiumgusslegierungen mittels Laserstrahlung**

von Dr.-Ing. Reiner Heigl  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

Als Dissertation genehmigt  
von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Prof. Dr. mont. Wilfried Kurz

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2004

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,  
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der  
Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem  
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-  
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-  
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0460-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
Abkürzungen und Formelzeichen .....	9
Extended Abstract .....	11
<b>1 Einführung .....</b>	<b>15</b>
1.1 Oberflächenveredeln .....	15
1.2 Werkstoffe .....	16
1.3 Anwendungen.....	18
1.4 Zielsetzung und Vorgehen .....	22
<b>2 Oberflächenveredelungsverfahren.....</b>	<b>23</b>
2.1 Anodische Oxidation.....	27
2.2 Außenstromloses Vernickeln .....	27
2.3 Galvanisieren.....	28
2.4 Thermisches Spritzen .....	29
2.4.1 Flammspritzen/HVOF.....	30
2.4.2 Plasmaspritzen.....	31
2.4.3 Lichtbogenspritzen.....	32
2.5 Laseroberflächenveredeln .....	32
2.5.1 Laserstrahlumschmelzen .....	36
2.5.2 Laserstrahldispergieren .....	37
2.5.3 Laserstrahllegieren .....	39
2.5.4 Laserstrahlbeschichten .....	41
<b>3 Physikalische und werkstofftechnische Mechanismen beim</b>	
<b>    Laseroberflächenveredeln.....</b>	<b>43</b>
3.1 Energieeinkopplung .....	44
3.1.1 Wechselwirkung Substrat/Laser.....	44
3.1.2 Wechselwirkung Laser/Pulver .....	47
3.2 Energiedissipation im Bauteil, Wärmeleitung .....	49
3.2.1 Theorie der Wärmeleitung in Metallen .....	50
3.2.2 Einfluss der Wärmeleitung auf den Laseroberflächenveredelungsprozess.....	51
3.3 Vorgänge der schmelzflüssigen Phase .....	52
3.3.1 Aufschmelzen von Grund- und Zusatzwerkstoff .....	53

3.3.2	Konvektion im Schmelzbad .....	54
3.3.3	Erstarrung der Schmelze .....	56
<b>4</b>	<b>Systemtechnik</b> .....	<b>60</b>
4.1	Konzeption der Laserbearbeitungsanlage .....	60
4.2	Realisierung der Laserbearbeitungsanlage .....	65
4.2.1	Handhabung und Steuerung .....	67
4.2.2	Strahlquellen .....	68
4.2.3	Zusatzwerkstoff .....	69
4.2.4	Sicherheit .....	74
<b>5</b>	<b>Laseroberflächenveredeln ohne Zusatzwerkstoff</b> .....	<b>77</b>
5.1	Ziele .....	77
5.2	Prozessgrundlagen .....	77
5.3	Prozesstechnische Ergebnisse .....	82
5.4	Werkstoffkundliche Ergebnisse .....	91
5.5	Diskussion .....	93
5.6	Zusammenfassung des Laseroberflächenveredeln ohne Zusatzwerkstoff .....	96
<b>6</b>	<b>Laseroberflächenveredeln mit Zusatzwerkstoff</b> .....	<b>98</b>
6.1	Ziele .....	98
6.2	Prozessgrundlagen .....	99
6.3	Prozesstechnische Ergebnisse .....	101
6.3.1	Abhängigkeit der Schichtgeometrie von den Prozessparametern .....	102
6.3.2	Prozesssicherheit .....	110
6.4	Werkstoffkundliche Ergebnisse .....	113
6.4.1	Laseroberflächenveredeln mit Aluminiumbasislegierungen .....	114
6.4.2	Laseroberflächenveredeln mit einer Kupferbasislegierung .....	131
6.4.3	Laseroberflächenveredeln mit einer Eisenbasislegierung .....	134
6.4.4	Laseroberflächenveredeln mit Wolframkarbid .....	141
6.5	Diskussion .....	150
6.6	Zusammenfassung des Laseroberflächenveredeln mit Zusatzwerkstoff .....	153
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>155</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b> .....	<b>158</b>
	Danksagung .....	169

# 1 Einführung

## 1.1 Oberflächenveredeln

Aufgrund ihrer vorteilhaften Eigenschaften haben Aluminiumlegierungen ein großes Anwendungsfeld vom Bauwesen über den Maschinenbau und die Verpackungsindustrie bis zum Verkehrswesen gefunden. Besonders hervorzuheben sind die physikalischen Eigenschaften des Aluminiums, insbesondere die Dichte und Festigkeit, welche in Verbindung mit den verfahrenstechnischen Möglichkeiten bei der Verarbeitung zu einem hohen Verbreitungsgrad des Werkstoffs Aluminium geführt haben. Allerdings sind die Oberflächeneigenschaften der Aluminiumlegierungen oft nicht ausreichend für die Anforderungen, die an sie gestellt werden. So können optische Eigenschaften und Haptik, aber auch das Festigkeits- oder Ermüdungsverhalten sowie die Verschleiß- oder Korrosionseigenschaften nicht ausreichend sein. Diese Mängel lassen sich nur bedingt durch eine Verbesserung der Legierungszusammensetzung beheben, sodass an dieser Stelle Verfahren des Oberflächenveredelns ansetzen, um durch eine Veränderung der oberflächennahen Bereiche oder der Oberfläche selbst verbesserte Bauteileigenschaften zu bewirken.

Der Bearbeitungsprozess des Oberflächenveredelns als industrieller Verfahrensschritt muss sowohl wirtschaftliche, als auch technologische Ziele erfüllen. Die technologischen Anforderungen sind in den funktionalen Eigenschaften des erzeugten Schichtverbundes definiert. Die Wirtschaftlichkeit andererseits verlangt die bestmögliche Ausnutzung der beteiligten Ressourcen und das Erreichen eines vorgegebenen Zeit- und Kostenrahmens. Allen Verfahren des Oberflächenveredelns sind folgende Ziele übergeordnet:

- Die Funktion und Zuverlässigkeit von Bauteilen zu verbessern, indem die Oberflächeneigenschaften optimal auf den Anwendungsfall und die Werkstoffbedingungen abgestimmt werden.
- Die Herstellkosten der Bauteile durch eine gesamtheitliche Betrachtung der Prozesskette unter Einbeziehen von sicheren, schnellen und kostengünstigen Bearbeitungsschritten zu minimieren.
- Die Ressourcen von Rohstoffen, Energie und Arbeit zu schonen, indem der Materialeinsatz reduziert wird und die Aufarbeitung von Bauteilen in einem geschlossenen Werkstückkreislauf erfolgen kann.

- Die Anzahl von Bauteilkomponenten einzusparen, indem durch den Einsatz einer Beschichtung mechanisch gefügte Elemente, z. B. Ventilsitzringe, entfallen können.

Unter diesen Randbedingungen bieten verschiedene Verfahren Lösungen, welche für die spezifische Bearbeitungsaufgabe bewertet werden müssen, sodass die Auswahl für den Produktionseinsatz unter Berücksichtigung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren erfolgt. An dieser Stelle gilt es für neue Bearbeitungsverfahren das Anforderungs- und Kostenprofil zu erfüllen, aber gleichzeitig auch neue technische Lösungswege zu eröffnen und neue Aufgabenfelder zu erschließen. Die neuen Lösungsansätze können in neue Möglichkeiten bei der Bauteilgestaltung münden, aber auch eine gesteigerte Leistungsfähigkeit oder Lebensdauer sowohl der Einzelbauteile, als auch der Aggregate bedeuten.

## 1.2 Werkstoffe

Die Maßnahmen zum Oberflächenveredeln sind abhängig von der Gesamtanwendung, d. h. von der Funktion und den Schädigungsmechanismen im untersuchten System und den Möglichkeiten, die der verwendete Substratwerkstoff bietet. Dies enthält eine Untersuchung des Bauteilversagens, aber auch der Arbeitsbedingungen der Baugruppe und deren Elemente. Aus der Kenntnis der Werkstoffschädigung und deren Ursachen können geeignete Maßnahmen zum Oberflächenveredeln vorgeschlagen werden. Die Oberflächenverfahren besitzen nicht nur unterschiedliche Eignungen in Bezug auf die Art der Werkstoffschädigung, sondern sind in hohem Maße abhängig von den Werkstoffen der betroffenen Einzelbauteile. Bei Stählen beispielsweise bestehen die Möglichkeiten des Randschichthärtens oder Nitrierens, welche bei Aluminiumlegierungen nicht angewandt werden können.

Bei Verfahren oder Verfahrensvarianten, die einen Zusatzwerkstoff verwenden, besteht ein weiterer werkstofflicher Aspekt in der Auswahl des Zusatzwerkstoffes. Hier müssen sowohl Anforderungen der Verarbeitbarkeit durch das jeweilige Verfahren, als auch der metallurgischen Verträglichkeit zum Grundwerkstoff und der Realisierung der gewünschten Oberflächeneigenschaften erfüllt werden. Die Werkstofffrage bekommt unter diesen Bedingungen eine zentrale Bedeutung.

Die Beschränkung auf Aluminiumlegierungen als Substratwerkstoffe erklärt sich aus den in [1] und [2] aufgezeigten, vielfältigen Möglichkeiten zur Eigenschaftsänderung, der verbreiteten Verwendung dieser Werkstoffgruppe im Automobilbau und der Motivation zur Weiter-

entwicklung des Leichtbaus. Im Automobilbau werden bereits verschiedene Aggregate- und Aufbaukomponenten aus Aluminium gefertigt. Die Schwerpunkte sind hier die Bereiche von Motor und Getriebe sowie Karosserie und Achsen. Die Themen für die Verminderung oder Beseitigung einer Werkstoffschädigung in Form von Abnutzung und/oder Überbeanspruchung an Gusslegierungen konzentrieren sich hauptsächlich auf den Motor und seine Bauteile. Infolge der erhöhten Leistungsdichten der Verbrennungsmotoren wird sowohl das mechanische als auch das thermische Belastungsniveau der Bauteile laufend erhöht. Diesen Anforderungen wird begegnet, indem neue konstruktive Lösungen gesucht oder hochwertigere Werkstoffe verwendet werden. Da an vielen Bauteilen gestalterische Änderungen sehr schwierig sind, ist der Bedarf an hochfesteren oder verschleißbeständigeren Werkstoffen permanent vorhanden. Die Herstellung von Schichten ist eine Option diese Materialien in ein Antriebsaggregat zu integrieren und damit einen Beitrag zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und des Wirkungsgrades im Gesamtsystem Automobil zu leisten. Der Einsatz der Schichtwerkstoffe für eine Festigkeitssteigerung oder eine Verschleißminderung enthält zwei verschiedene Ansatzpunkte, die unterschiedliche Maßnahmen und Werkstoffe erfordern.

Motoren oder Getriebe sind stark wechselnden Temperaturen und Kräften bzw. Momenten unterworfen. Das Werkstoffverhalten muss dem gerecht werden, sodass für die Bauteile eine ausreichende Warmfestigkeit oder Warmhärte gefordert wird. Das Werkstoffverhalten bei höheren Temperaturen ist abhängig von den äußeren Bedingungen des Bauteils. So haben die mechanischen und thermischen Belastungen bzw. Belastungszyklen und die Zeitdauer, in welcher das Bauteil den Beanspruchungen ausgesetzt ist, einen großen Einfluss auf das Werkstoffverhalten. Die Werkstoffveränderungen werden abhängig von der Art der mechanischen Belastung unterschieden in Kriechvorgänge, die bei konstanter mechanischer Belastung ablaufen und Ermüdungsvorgänge, bei denen sich mechanische und thermo-mechanische Belastungszyklen häufig wiederholen [4], [5], [7].

Auch die tribologischen Themenfelder sind durch die erhöhten mechanischen und thermischen Bauteilbelastungen einer laufenden Verschärfung ihrer Randbedingungen unterworfen. Hochwertigere Werkstoffe müssen eingesetzt werden um den wachsenden Anforderungen an Lagern und Ventilsitzen gerecht werden zu können. Durch den verkleinerten Bauraum von Motoren werden in den Kurbelgehäusen verstärkt Schichten statt Buchsenlösungen eingesetzt, um die Eigenschaften für eine Zylinderlaufbahn zu gewährleisten. Hierfür werden gleichzeitig reibungsarme und trotzdem verschleißbeständige Oberflächen gefordert. Untereutektische und