

# Verbesserte mechanische Oberflächenverfestigung von Schaufeln an integral beschaufelten Hochdruckverdichterrotern

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und  
Wirtschaftsingenieurwesen der Brandenburgischen  
Technischen Universität Cottbus

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Ingenieur

**Goetz G. Feldmann**

geboren am 22.05.1978 in Bünde

Vorsitzender : Prof. Dr.-Ing. habil. Vesselin Michailov  
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens  
Gutachter : Prof. Dr.-Ing. Bernd Viehweger  
Gutachter : Dr.-Ing. Thomas Haubold  
Tag der mündlichen Prüfung : 15. März 2012



Berichte aus der Fertigungstechnik

**Goetz G. Feldmann**

**Verbesserte mechanische Oberflächenverfestigung  
von Schaufeln an integral beschaufelten  
Hochdruckverdichterrotoren**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.

Zugl.: Cottbus, BTU, Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1050-3

ISSN 0945-0769

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

In dieser Arbeit ist ein Teil meiner Tätigkeit der vergangenen drei Jahre in der Abteilung „manufacturing engineering“ und „capability acquisition“ der Rolls-Royce GmbH & Co. KG in Oberursel (*Taunus*) zusammengefasst. Neben der Optimierung von bestehenden Verfahren galt die Aufmerksamkeit der Neuentwicklung von Fertigungsverfahren bezogen auf die Bearbeitung von geometrisch hoch komplexen, dynamisch, multiaxial, thermisch und mechanisch belasteten Kerntriebwerksbauteilen.

Zu Dank bin ich allen voran Dr.-Ing. Thomas Haubold verpflichtet, ohne den ich einen völlig anderen Weg eingeschlagen hätte. Danke das Du stets an mich geglaubt hast und mich immer wieder zurück auf Kurs gebracht hast. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Leyens, dem Inhaber des Lehrstuhls für Werkstofftechnik der Technischen Universität Dresden, Leiter der Abteilung für thermische Beschichtungsverfahren am Fraunhofer IWS in Dresden sowie assoziierter Direktor des Instituts für Werkstoff-Forschung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrttechnik in Köln, der trotz örtlicher Entfernung und zeitlichen Beschränkungen die Betreuung meiner Arbeit übernommen hat und regelmäßig produktive Fortschrittsgespräche ermöglichte.

An dieser Stelle möchte ich mich ebenfalls ganz herzlich bei all meinen Kollegen aus der Abteilung für die produktiven Diskussionen, die stets offene Ohren, die uneingeschränkte Wissensteilung und die nette Zusammenarbeit bedanken. Besonders zu nennen sind Wolfgang Hennig, Mentor in Sachen Kugelstrahlen, Dr.-Ing. Andreas Kohns, Lektor und Kritiker, Jörg Weigand, der mir bei allen geometrischen Problemen eine unschätzbare Hilfe war und Thomas Schäfer, der mich bei diversen Dauerschwingversuchen unterstützt hat. Desweiteren danke ich allen Rolls-Royce Kollegen, die mir stets mit Rat und Tat bei der ein oder anderen Spezialaufgabe behilflich waren.

Darüberhinaus möchte ich mich ebenfalls bei den Mitarbeitern des Instituts für Werkstofftechnik der Universität Kassel bedanken. Allen voran geht mein Dank an Dr.-Ing. Wolfgang Zinn und Prof. Dr.-Ing. Berthold Scholtes, die mit ihrem Team stets unkonventionelle Lösungen zeitnah umzusetzen vermochten. Deswei-

teren haben mir bei der Durchführung diverser Versuchsreihen die Mitarbeiter der Firmen Rösler Oberflächentechnik GmbH, ECOROLL AG, GEVA Gesellschaft für Entwicklung und Versuch Adlershof mbH, Comanie de Saint Gobain SEPR, SR Technics Zürich, Henschel KG und C.F.K. CNC-Fertigungstechnik Kriftel GmbH zur Seite gestanden.

Vielen Dank.

Aus tiefstem Herzen möchte ich noch den Menschen Danken, die immer uneingeschränkt hinter mir standen, mich auf den Boden der Tatsachen hielten und mich stets mit allen verfügbaren Mitteln unterstützten, meinen Eltern Ingrid und Gernot, meinem Bruder Lutz und meine Freundin Anca.

Diese Arbeit möchte ich meinem Vater widmen, ohne dessen Vertrauen, Glauben und nicht zu vergessen finanzielle Unterstützung dies nie möglich gewesen wäre.

Oberursel, im Frühling 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>Titelseite</b>	<b>i</b>
<b>Danksagung</b>	<b>iii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>1 Vorwort</b>	<b>1</b>
<b>2 Zielsetzung und Aufgabenstellung</b>	<b>5</b>
<b>3 Grundlagen, Stand der Technik</b>	<b>7</b>
3.1 Flugzeugtriebwerke . . . . .	7
3.1.1 Kernkomponenten . . . . .	8
3.1.2 Verdichter . . . . .	11
3.1.3 Blisk und Blisk-Rotoren . . . . .	12
3.1.4 Betriebsbelastungen . . . . .	16
3.2 Oberflächenverfestigung . . . . .	18
3.2.1 Oberflächentopographie . . . . .	18
3.2.2 Mechanische Oberflächenverfestigung . . . . .	19
3.2.3 Kaltverfestigung . . . . .	20
3.2.4 Eigenspannungen . . . . .	20
3.3 Werkstoffe . . . . .	23
3.3.1 Titanlegierungen . . . . .	23

3.3.2	Nickellegierungen . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Oberflächenverfestigungsverfahren</b>	<b>27</b>
4.1	Strahlverfahrenstechnik . . . . .	28
4.1.1	Grundlagen und Begriffe . . . . .	28
4.1.2	Kugelstrahlen - Shot Peening . . . . .	32
4.2	Festwalzen - Deep Rolling . . . . .	37
4.2.1	Grundlagen und Begriffe . . . . .	37
4.3	Schleifen und Polieren . . . . .	42
4.3.1	Gleitschleifen - Vibrofinishing . . . . .	43
4.3.2	Kugeldruckpolieren - Vibropeening . . . . .	43
4.4	Weitere Verfahren . . . . .	45
4.4.1	Laserschockverfestigen . . . . .	45
4.4.2	Plasmainpulsverfestigen . . . . .	45
4.4.3	Kavitationsverfestigen . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Analysierte Kenngrößen</b>	<b>49</b>
5.1	Rauheit . . . . .	49
5.2	Eigenspannungsmessung und Integralbreiten . . . . .	50
5.3	Dauerschwingfestigkeit . . . . .	51
5.4	Eindringprüfung und Vermessung der Risse . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Phase I: Vorversuche</b>	<b>53</b>
6.1	Versuchmethodik I . . . . .	53
6.1.1	Ti6246 Proben . . . . .	54
6.1.2	IN718 Proben . . . . .	55
6.2	Experimentelle Ergebnisse I RS-Proben . . . . .	58
6.2.1	Oberflächentopographie (Ti6246) . . . . .	58
6.2.2	Eigenspannungszustand (Ti6246) . . . . .	59
6.2.3	Oberflächentopographie (IN718) . . . . .	61
6.2.4	Eigenspannungszustand (IN718) . . . . .	65
6.3	Bewertung und Auswahl . . . . .	76

<b>7</b>	<b>Phase II: Prozessentwicklung</b>	<b>79</b>
7.1	Versuchsmethodik II . . . . .	79
7.1.1	Kugelstrahlen und Gleitschleifen . . . . .	80
7.1.2	Kugeldruckpolieren . . . . .	81
7.1.3	Festwalzen . . . . .	81
7.2	Experimentelle Ergebnisse II IN718 Schaufeln . . . . .	82
7.2.1	Oberflächentopographie . . . . .	82
7.2.2	Eigenspannungszustand . . . . .	83
7.2.3	Geometrieänderung . . . . .	95
7.2.4	Ermüdungsverhalten . . . . .	99
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>105</b>
8.1	Oberflächeneigenschaften . . . . .	105
8.1.1	Rauheit . . . . .	105
8.1.2	Eigenspannungen und Integralbreiten . . . . .	105
8.2	Ermüdungsverhalten . . . . .	113
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>115</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>121</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>133</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>137</b>
	<b>Anhang</b>	<b>139</b>
A	XRD Phase I Ti6246 . . . . .	140
B	Ra Phase I IN718 Kugelstrahlen . . . . .	141
C	Ra Phase I IN718 Kugeldruckpolieren . . . . .	142
D	XRD Phase I IN718 Kugelstrahlen . . . . .	143
D.1	Z210 . . . . .	143
D.2	Y210 . . . . .	144

E	XRD Phase I IN718 Verfahrensvergleich . . . . .	145
F	XRD Phase I IN718 Festwalzen . . . . .	148
G	Vergleich Kugelstrahlen (Ti6246 vs. IN718) . . . . .	149
H	Ra Phase II IN718 Schaufel . . . . .	150
I	XRD & HDM Phase II IN718 Schaufel . . . . .	151
	I.1 Kugelstrahlen und Gleitschleifen . . . . .	151
J	Festwalzen . . . . .	152
<b>Lebenslauf</b>		<b>153</b>

# Abkürzungsverzeichnis

1F	1. Biegeschwingung ( <i>1st flap</i> )
3D	3 dimensional
$a$	halbe Breite der Eindruckzone
$a_{DR}$	Walzspurbreite ( <i>Deep Rolling track width</i> )
AF-Level	Amplitude-Frequenz-Level
AFM	Druckfließläppen ( <i>abrasiv flow machining</i> )
AMS	amerikanische Luftfahrt Material Spezifikation ( <i>Aerospace Material Specification</i> )
$b$	Breite des Almenstreifens
$b_{DR}$	Walzbahnabstand ( <i>Deep Rolling track distance</i> )
bling	integralbeschaufelter Ring ( <i>blade integrated ring</i> )
blisk	integralbeschaufelte Scheibe ( <i>blade integrated disk</i> )
BR725	2-Wellen-Triebwerk für Geschäftsreiseflugzeuge
$C$	Flächenüberdeckung ( <i>coverage</i> ) nach n Durchgängen
$C_1$	Flächenüberdeckung ( <i>coverage</i> ) nach einem Durchgang
CCF	kombiniert zyklische Ermüdung ( <i>combined cycle fatigue</i> )
CD	Kugelstrahlen Keramik trocken ( <i>ceramic dry</i> )
CMC	Keramikmatrix-Verbundwerkstoff ( <i>ceramic matrix composite</i> )
CP	Kavitationsverfestigen ( <i>cavitation peening</i> )
CW	Kugelstrahlen Keramik nass ( <i>ceramic wet</i> )
$d$	Höhe des Almenstreifens
$d_{DR}$	Durchmesser der Walzkugel
DIN	Deutsche Industrie Norm
DOD	Eigenkörperschaden ( <i>domestic object damage</i> )
ECM	electrochemische Bearbeitung ( <i>electro chemical machining</i> )
ELE	elliptische Schaufelvorderkante ( <i>elliptical leading edge</i> )
$\epsilon$	Dehnung
$\epsilon_r$	radiale Dehnung
$F$	Kraft
FE	Finite Elemente
FOD	Fremdkörperschaden ( <i>foreign object damage</i> )
GPa	Gigapascal

$h$	Eindrucktiefe
$h_0$	Durchbiegung des Almenstreifens, Bogenhöhe
$h_{DR}$	Durchbiegung Almenstreifen durch Festwalzen
HCF	hochfrequente Ermüdung ( <i>high cycle fatigue</i> ), Dauerschwingfestigkeit
HDM	Bohrlochmethode ( <i>hole drilling method</i> )
HG3	Festwalzwerkzeug
HG6	Festwalzwerkzeug
HPC	Hochdruckverdichter ( <i>high pressure compressor</i> )
HRC	Härte nach Rockwell
HV	Härte nach Vickers
I	Almenintensität
IB	Integralbreite
IN718	Nickelbasislegierung
IPC	Mitteldruckverdichter ( <i>intermediate pressure compressor</i> )
ISF	isotrope Feinstbearbeitung ( <i>isotropic superfinishing</i> )
JIS-Panel	Kontrollkörper mit definiertem Rissbild
$k\alpha$	Strahlungsart
$l$	Länge Almenstreifen
$l_1$	Risslänge
$l_2$	Risslage
LCF	niederfrequente Ermüdung ( <i>low cycle fatigue</i> ), Zeitschwingfestigkeit
LE	Schaufelfoderkante ( <i>leading edge</i> )
LPC	Niederdruckverdichter ( <i>low pressure compressor</i> )
LSP	Laserschockverfestigen ( <i>laser shock peening</i> )
mHz	Einheit Dauerschwingfestigkeit MeterHertz
mmA	Einheit Intensität bezogen auf Almenstreifen Klasse A
MMC	Metallmatrix-Verbundwerkstoff ( <i>metal matrix composite</i> )
mmC	Einheit Intensität bezogen auf Almenstreifen Klasse C
mmN	Einheit Intensität bezogen auf Almenstreifen Klasse N
MPa	Megapascal
$n$	Anzahl der Durchgänge
NC	numerische Steuerung ( <i>numerical control</i> )
NDT	zerstörungsfreie Prüfung ( <i>non destructive testing</i> )
NMC	Nickelbasismatrix-Verbundwerkstoff ( <i>nickel base matrix composite</i> )
$p$	Druck
$p_0$	Maximalwert der Hertz'schen Pressung
$\pi$	Druckverhältnis
ppm	Teile pro Millionen ( <i>parts per million</i> )
PS	Druckseite ( <i>pressure side</i> )
$\psi$	Kippwinkel

Ra	arithmetischer Mittelrauhwert
REM	chemisch unterstütztes Gleitschleifen ( <i>chemical supported barrel finishing</i> )
REW	3 alpha Code für IN718
RS	Eigenspannung ( <i>residual stress</i> )
Rz	gemittelte Rauhtiefe
S70	Kugelstrahlmedium
SAE	Verband der Automobilingenieure ( <i>Society of Automotive Engineering</i> )
SD	Kugelstrahlen Stahl trocken ( <i>steel dry</i> )
$\sigma_{ES}$	Eigenspannung
$\sigma_{x,y,z}$	Normalspannung
$\sin^2\psi$	Eigenspannungsberechnungsmethode
SP	Kugelstrahlen ( <i>shot peening</i> )
SS	Saugseite ( <i>suction side</i> )
Stg.	Stufe ( <i>stage</i> )
$T$	Strahlzeit
$\tau_{max}$	maximale Schubspannung
TE	Schaufelhinterkante ( <i>trailing edge</i> )
$\theta$	Winkelbereich
Ti6246	Titanlegierung
TIP	Schaufelspitze ( <i>blade tip</i> )
TJK	3 alpha Code für Ti6246
TMX	Titanmatrix-Verbundwerkstoff ( <i>titanium matrix composite</i> )
USP	Ultraschallkugelstrahlen ( <i>ultrasonic shot peening</i> )
VP	Kugeldruckpolieren ( <i>vibropeening</i> )
XRD	Röntgendiffraktometrie ( <i>x-ray diffraction</i> )
XWB	extrabreiter Rumpf ( <i>extra wide body</i> )
Y210	keramisches Kugelstrahlmedium
$z$	Tiefe
Z210	keramisches Kugelstrahlmedium
ZL37	Bezeichnung Eindringmittel zur Rissprüfung