



**Berichte aus dem
Institut für Fertigungstechnik
und Qualitätssicherung
Magdeburg**

**Bearbeitung korrosionsbeständiger
LDS-Schichten und deren
tribologische Beurteilung**

Maximilian Wenzel

Band 48

Shaker Verlag

Bearbeitung korrosionsbeständiger LDS-Schichten und deren tribologische Beurteilung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

von M.Sc. Maximilian Wenzel

geboren am 13.08.1988 in Prenzlau

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau

der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder

Dr. sc. techn. Stefan Schweickert

Promotionskolloquium am 19.11.2020

Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und
Qualitätssicherung Magdeburg

Band 48

Maximilian Wenzel

**Bearbeitung korrosionsbeständiger LDS-Schichten
und deren tribologische Beurteilung**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7869-5

ISSN 1863-0936

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Verfahrensentwicklung der Daimler AG im Mercedes-Benz Werk Untertürkheim. Die universitäre Betreuung erfolgt durch das Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Mein ganz besonderer Dank gebührt an erster Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Karpuschewski für die fachliche Betreuung dieser Dissertation. Ich bedanke mich für die interessanten und lehrreichen Diskussionen, die diese Dissertation entscheidend mitgeprägt haben. Herzlichen Dank für das in mich und meine Arbeit gesetzte Vertrauen!

Herrn Dr. sc. techn. Stefan Schweickert danke ich recht herzlich für die Übernahme des Koreferats und die Möglichkeit, ein solch spannendes Projekt in der Verfahrensentwicklung der Daimler AG bearbeiten zu dürfen. Weiterhin möchte ich mich für die hervorragende Betreuung und Unterstützung bei der Umsetzung dieser gesamten Arbeit bedanken.

Bei Herrn Prof. Dr. Klaus Dröder, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik und Prozessautomatisierung an der Technischen Universität Braunschweig, bedanke ich mich für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein besonderer Dank gilt meinem Kollegen und Freund Dr. Ulrich Mayer für die zahlreichen Anregungen und das allzeit offene Ohr und Wort bei fachlichen Diskursen. Danke Uli, du bist der Beste!

Außerdem möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Teamleiter Klaus Geiger bedanken, ohne die enorme Unterstützung seinerseits wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen. Ich bin dir für ewig dankbar!

Des Weiteren möchte ich mich bei den Kollegen Joachim Vogt, Dorothea Widmann, Bernd Schneckeburger, Dr. Sascha Kreter und Thomas Kreisler für die zahlreichen Stunden und Versuche am Bearbeitungszentrum und an der Honanlage bedanken. Zudem bedanke ich mich bei den Kollegen Jürgen Traber, Sven Colombo, Sören Schröter, Frieder Zimmer, Günther Rau, Bernd Schilder und Fabian Reimer vom Team Feinbearbeitung für die stetige Unterstützung und Motivation. Ein zusätzlicher Dank gilt auch den Kollegen aus dem Nachbarsteam und dem Technikum.

In diese Dissertation sind auch Ergebnisse aus diversen Bachelor- und Master-Abschlussarbeiten eingeflossen. Diesbezüglich spreche ich den von mir betreuten Studenten Daniel Henning, Markus Mirz, Tim Weingärtner, Manuel Vogt, Julian Kumpf und Sonja Taheri meinen herzlichen Dank aus.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Frau Erika und meinen zwei Kindern Leon und Moritz für ihre bedingungslose und liebevolle Unterstützung. Ich liebe euch!

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern Peggy und Uwe, meiner Schwester Elisa Zisenis und meinen Schwager Joscha Zisenis für die Unterstützung und Motivation über all die Jahre. Ein ganz besonderer Dank gehört auch meiner Oma Heidemarie Blank und Willy Radzey, die mich in jeder nur denkbaren Form unterstützt haben. Auch bei meinen Schwiegereltern Lilli und Georg Lackmann und meinem Schwager Magnus Lackmann möchte ich mich bedanken für die Unterstützung und die liebevolle Betreuung meiner Kinder während meiner Arbeit.

Kurzfassung

Seit einigen Jahren werden zur Gewichts- und Verbrauchsverringerung erfolgreich thermisch gespritzte Schichtsysteme als Zylinderlaufflächen eingesetzt. Diese dünnen Eisenbasis-schichten ersetzen schwere Graugussbuchsen und weisen nach dem Honen eine geringe Rauheit mit einer als Schmierölrervoir dienenden Oberflächenporosität auf, die die Laufbahnreibung signifikant verringert. Aufgrund der hohen Wirtschaftlichkeit und Prozessstabilität eignet sich besonders das Lichtbogendrahtspritzen für die Großserienanwendung.

Es wird erwartet, dass sich in Zukunft die Anforderungen an den Verbrennungsmotor ändern bzw. weiter steigen werden. Durch den Anspruch, den Kraftstoffverbrauch bzw. die CO₂-Emissionen weiter zu reduzieren, erhöhen sich auch die thermisch-mechanischen Belastungen des Kurbelgehäuses durch z. B. eine Steigerung der Zünddrücke und höhere Abgasrückführaten. In Kombination mit neuen Kraftstoffen oder unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten, die erhöhte Anteile an Schwefel enthalten oder biologischen Ursprungs sind, erhöht sich auch die chemisch-korrosive Belastung. Aus diesem Grund ist es ein Ziel der Motor- und Prozessentwicklung, neue korrosionsbeständige Spritzschichten zu qualifizieren, die nicht nur reibungsarm und verschleißfest, sondern auch korrosionsbeständig in einer chemisch aggressiven Umgebung sind.

Zur Erfüllung der Anforderungen einer resistenten Laufbahn gegen Korrosion wurden zwei neue Spritzwerkstoffe mit hohem Chromanteil ausgewählt und charakterisiert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den genannten Werkstoffen und den Wirkmechanismen der einzelnen Bearbeitungsschritte zur Herstellung korrosionsbeständiger Zylinderlaufbahnen auf Basis der aktuellen Fertigungskette. Daher wird der Beschichtungsprozess, die Vorbearbeitung und die Herstellung der Funktionsoberfläche durch Honen untersucht und in Bezug auf die Großserienfertigung bewertet.

Bei der Vorbearbeitung zeigt sich, dass der aktuelle Feindrehprozess starkem Werkzeugverschleiß unterliegt. Zusätzlich zur Prozessoptimierung für das Drehen wird daher als Alternative ein Schleifprozess entwickelt, der auf einem herkömmlichen Bearbeitungszentrum durchgeführt werden kann.

Durch Parametervariationen werden die Wirkmechanismen des Beschichtungsprozesses bei korrosionsbeständigen Schichtwerkstoffen quantifiziert und die Auswirkungen auf die Funktionsoberfläche nach dem abschließenden Honprozess ermittelt. Darüber hinaus wird auch der Honprozess selbst untersucht, inklusive der Abhängigkeit der erzeugten Oberflächenstruktur durch unterschiedliche Werkzeuge und Honprozessketten.

Insgesamt ist es das Ziel, eine wirtschaftliche und funktionale Prozesskette für einen korrosionsbeständigen Schichtwerkstoff zu entwickeln und abzusichern. Hierfür dient der aktuell eingesetzte Schichtwerkstoff und besonders seine Oberflächenqualität als Referenz bei der Beurteilung des tribologischen Verhaltens der hochlegierten Schichtwerkstoffe. Die Bestimmung der Grenzreibung erfolgt dabei durch den oszillierenden Modellkontakt in einem Schwing-Reib-Verschleißtribometer. In Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit werden die Reibkoeffizienten der Schichtsysteme in Rotations-Reib-Verschleiß-Versuchen ermittelt und vergleichend bewertet.

Abstract

For several years now, thermally sprayed coating systems have been successfully used as cylinder running surfaces, to reduce weight and energy consumption. These thin iron-based layers replace heavy grey cast iron liners and, after honing them, have a low surface roughness and a surface porosity that serves as a reservoir for lubricating oil. This significantly reduces the friction of the cylinder liner. Due to its high economic efficiency and process stability, Twin Wire Arc Spraying (TWAS) is particularly suitable for high volume applications.

It is expected that the requirements for the combustion engine will change, and will likely continue to rise. The demand to further reduce fuel consumption and CO₂ emissions also increases the thermal-mechanical loads on the crankcase, e.g. an increase in ignition pressures and higher exhaust gas recirculation rates. In combination with new fuels or different fuel qualities, which contain increased amounts of Sulphur or are of biological origin, the chemical-corrosive load also increases. For this reason, one objective of both engine and process development is to identify new spray coating layers that are not only low friction and wear-resistant, but also corrosion-resistant in a chemically aggressive environment.

In order to meet the necessary requirements for a cylinder liner resistant to corrosion, two new spray materials with a high chromium content were selected and defined. This thesis deals with the above-mentioned materials and their mechanisms of action in the individual processing steps for the production of corrosion-resistant cylinder liners based on the current production chain. Therefore, the coating process, the pre-processing and the production of the functional surface through honing techniques is examined and evaluated in relation to large-scale production.

During pre-machining, it becomes apparent that the tools being employed for the current fine-turning process are subject to heavy wear. In addition to optimization of the turning process, a grinding process is therefore being developed as an alternative, which can be operated through a conventional machining center.

Through parameter variations, the mechanisms of the coating process for corrosion-resistant coating materials are quantified, and the effects on the functional surface are determined after the final honing process. In addition, the honing process itself is also examined, including the dependence of the generated surface structure on different tools and honing process chains.

Overall, the primary objective is to develop and secure an economical and functional process chain for a corrosion-resistant coating layer material. For this purpose, the currently used coating material, and especially its surface quality, serves as a reference in the assessment of the tribological behaviour of the high-alloy edging materials. The measurement of the boundary friction is carried out by the oscillating model contact in a vibrating-friction wear tribometer. Depending on the sliding speed, the friction coefficients of the coating systems are determined and comparatively evaluated in rotation friction-wear tests.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen und Formelzeichen	IV
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	2
2.1 Zylinderkurbelgehäuse.....	2
2.1.1 Werkstoffe und Laufflächenkonzepte.....	3
2.1.2 Korrosion von Zylinderlaufbahnen.....	9
2.1.3 Tribologie im Kolbensystem.....	11
2.2 Fertigungsverfahren für die Zylinderbearbeitung.....	15
2.2.1 Innen-Langhubhonen.....	15
2.2.2 Feindreihen von Zylinderbohrungen.....	20
2.2.3 Innenrundscheifen.....	23
2.3 Statistische Versuchsplanung.....	24
2.3.1 Versuchspläne.....	26
2.3.2 Durchführung und Auswertung.....	27
3. Prozesskette zur Laufbahnherstellung	28
3.1 Zylinderaktivierung.....	29
3.1.1 Hochdruckwasserstrahlen.....	30
3.1.2 Mechanisches Aufrauen.....	31
3.2 Lichtbogendrahtspritzen.....	33
3.3 Vorbearbeitung.....	34
3.3.1 Schrupphonen.....	34
3.3.2 Feindreihen.....	34
3.4 Honen.....	35
4. Rahmenbedingungen für die Untersuchungen	36
4.1 Versuchswerkstücke.....	36
4.2 Bearbeitungszentrum und Umgebung.....	36
4.3 Bearbeitungsanlage für unterschiedliche Ölsorten und-drücke.....	37
4.4 Beschichtungsanlage.....	38
4.4.1 LDS-Anlage.....	38
4.4.2 Brenner.....	39
4.4.3 Stromquelle.....	40
4.5 Honversuchsanlage.....	41
4.5.1 Honmaschine Nagel VARIOHONE 2.....	41
4.5.2 Honwerkzeuge.....	41
4.6 Messmittel und Messtechnik.....	42
4.6.1 Formmessungen von Zylinderbohrungen.....	42
4.6.2 Messung gehonter Oberflächen.....	43
4.6.3 Schichtdiagnostik.....	46

4.6.4 Strahl- und Partikeldiagnostik	48
4.7 Schwingreibverschleiß-Prüfstand (SRV)	52
4.7.1 Versuchsaufbau	52
4.7.2 Versuchsdurchführung	53
4.8 Rotationsreibverschleiß-Prüfstand (RRV)	54
4.8.1 Versuchsaufbau	54
4.8.2 Versuchsablauf und -matrix	55
5. Ausgangssituation und Zielsetzung	57
5.1 Ausgangssituation	57
5.2 Werkstoffauswahl	57
5.3 Zielsetzung	59
5.4 Vorgehensweise	59
6. Charakterisierung der Beschichtungswerkstoffe	62
6.1 Analyse der Werkstoffe im Ausgangszustand	62
6.1.1 Chemische Zusammensetzung der Drähte	62
6.1.2 Gefügeanalyse im drahtförmigen Zustand	63
6.2 Analyse der Werkstoffe nach dem thermischen Spritzen	65
6.2.1 Herstellung der Probenmaterialien	65
6.2.2 Gefügeanalyse und Schichthärte	66
6.2.3 Energiedispersive Röntgenanalyse	69
7. Untersuchungen des Einflusses thermisch gespritzter Chromstähle auf die Bearbeitungsprozesse	70
7.1 Rahmenbedingungen für die Bearbeitungsversuche	70
7.2 Feindreihen	72
7.2.1 Werkzeug und Zerspanvorgang	72
7.2.2 Voruntersuchungen mit dem Serienwerkzeug	74
7.2.3 Einfluss Bearbeitungsparameter	76
7.2.4 Einfluss Schneidengeometrie	79
7.2.5 Einfluss unterschiedlicher cBN-Schneidstoffe	82
7.2.6 Schneidenanalyse	85
7.2.7 Bearbeitung mit PKD-Schneidstoffen	87
7.2.8 Untersuchung unterschiedlicher Ölsorten und -drücke	90
7.2.9 Zwischenfazit	93
7.3 Zirkularschleifen	94
7.3.1 Versuchseinrichtung	94
7.3.2 Prinzipversuche	99
7.3.3 Einflussuntersuchungen der Kornbelegungsfläche und der Korngröße	102
7.3.4 Reduzierung der Bearbeitungszeit	104
7.3.5 Standzeitbewertung	105
7.3.6 Qualifikation der geschliffenen Zylinderbohrung für die Honbearbeitung ...	108
7.3.7 Zusammenfassung	109
7.4 Zusammenfassung der Vorbearbeitung	110

8. Untersuchungen der funktionalen Zusammenhänge zwischen der LDS-Beschichtung und der Honbearbeitung von Zylinderbohrungen.....	111
8.1 Versuchsdurchführung	111
8.2 Ergebnisse des Strahl- und Partikeldiagnostiksystems	112
8.3 Einfluss der Beschichtung auf die Honbearbeitung	119
8.3.1 Ziel und Vorgehensweise.....	119
8.3.2 Versuchsplan	120
8.3.3 Versuchsauswertung nach der Honbearbeitung.....	121
8.3.4 Schichtdiagnostik.....	124
8.4 Zusammenfassung	129
9. Auswirkungen der Honbearbeitung auf die Funktionsoberflächen bei korrosionsbeständigen Spritzschichten sowie deren tribologisches Verhalten ..	130
9.1 Rahmenbedingungen der Honbearbeitung.....	130
9.2 Versuchsdurchführung.....	131
9.2.1 Fertigungsschritte beim Honen.....	131
9.2.2 Versuchsplanung der Honuntersuchungen.....	133
9.3 Untersuchungen von funktionalen Zusammenhängen bei der zweifachen keramischen Honung.....	133
9.3.1 Vergleich der Honoberflächen unter Serienbedingungen	134
9.3.2 Ergebnisse der DoE für die zweifache keramische Honung.....	134
9.4 Untersuchungen von funktionalen Zusammenhängen bei der einfachen keramischen Honung	136
9.4.1 Ergebnisse der DoE für die einfache keramische Honung.....	136
9.5 Vergleich der Oberflächenqualitäten	139
9.6 Zusammenfassung	141
9.7 Endoberfläche und Funktion	142
9.7.1 Herstellung von Probenkörpern	142
9.7.2 Schwingreibverschleiß-Prüfstand (SRV)	142
9.7.3 Rotationsreibverschleiß-Prüfstand (RRV).....	144
9.7.4 Zusammenfassung	148
10. Diskussion und Ausblick.....	149
10.1 Vorbearbeitung der thermisch gespritzten Zylinderlaufbahnen.....	149
10.2 Untersuchung des LDS-Verfahrens bei hochlegierten LDS-Chromwerkstoffen...	150
10.3 Untersuchung der Honbearbeitung an hochlegierten LDS-Chromwerkstoffen	152
10.4 Tribologische Untersuchungen korrosionsbeständiger LDS-Werkstoffe.....	153
10.5 Ganzheitliche Betrachtung der Serienfertigung	154
11. Zusammenfassung	156
Literaturverzeichnis.....	158
Anhang	VIII

Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzung	Beschreibung
1.0479	Werkstoffbezeichnung 13Mn6
1.4021	Werkstoffbezeichnung X20Cr13
1.4122	Werkstoffbezeichnung X39CrMo17-1
Abblue®	Harnstoff
AGR	Abgasrückführungsrate
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid (Korund)
AlSi	Aluminium-Silizium-Legierung
ALUSIL®	übereutektische AlSi-Buchsen
ANOVA	Varianzanalyse (engl. one-way analysis of variance)
APS	Atmosphärisches Plasma Spritzen
BAZ	Bearbeitungszentrum
BSE	Rückstreustrahlung(engl. backscattered electrons)
CBC200	CylinderBoreCoating 200
cBN	kubisch kristallines Bornitrid
CCD-Sensor	charge-coupled device (dt. ladungsgekoppeltes Bauteil)
CP	center point (dt. Zentralpunkt)
CT	Computertomographie
DC	Gleichstrom
DLC	diamond-like carbon (dt. Amorpher Kohlenstoff)
DoE	Design of Experiments
DPV-2000	Partikelstrahl-Diagnostiksystem der Firma Tecnar
EBSD	Elektronenrückstreubeugung
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
EMZ	Elektrisch-Mechanische Zustellung
EPR	Elektrochemische-Potentiodynamische-Reaktivierung
FEM	Finite-Elemente-Methode
MS Gesamt	Gesamtmittel der Quadrate
GJL	Lamellengraphit
GJV	Vermiculargraphit
H ₀	Nullhypothese
H ₁	Alternativhypothese

HAZ	Hydraulische Zustellung
HDWS	Hochdruckwasserstrahlverfahren
HSK	Hohlschaftkegel
HTK	Hochtemperaturkorrosion
HV	Härtemessung nach Vickers
HX-Platte	hexagonalen Schneidplatte
IPS-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry
KGH	Kurbelgehäuse
KW	Kurbelwelle
LCC	load carrying capacity – dt. maximal ertragbaren Last
LDS	Lichtbogendrahtspritzen
M133	Interne Motorenbezeichnung der Daimler AG (4-Zylinder Ottomotor)
MAG-Schweißen	Metall-Aktivgas-Schweißen
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MKD	monokristalline Diamanten
MSE	mittleren quadrierten Fehler
NC, CNC	Numerical Control, Computerized Numerical Control
NikSil®	galvanische NiSiC Dispersion
NMRP	Nissan Mechanical Roughening Process
OT	oberer Totpunkt vom Kurbeltrieb ($v = 0$ m/s)
P.A.T.	Precision Adhesion Tester
PKD	Polykristalline Diamanten
PTWA	Plasma-Transferred-Wire-Arc
PVD	physical vapour deposition - physikalische Gasphasenabscheidungsverfahren
PVI	Particle-Velocity-Imaging
R	Radius
REM	Rasterelektronenmikroskop
R-Qd(kor)-Wert / R^2 (kor)-Wert	korrigierte Bestimmtheitsmaß
R-Qd-Wert / R^2 -Wert	Bestimmtheitsmaß für das Regressionsmodell
RRV-Prüfstand	Rotationsreibverschleiß-Prüfstand
SiC	Siliziumkarbid
SKV	Schneidkantenversatz
slpm	Standard-Liter pro Minute
SPK	Stromdicht-Potentialmessung
SprayWatch	Partikelstrahl-Diagnostiksystem der Firma Oseir Ltd.

Abkürzungen und Formelzeichen

SRV-Prüfstand	Schwingreibverschleiß-Prüfstand
TS	Thermisches Spritzen
UT	unterer Totpunkt vom Kurbeltrieb ($v = 0$ m/s)
WLI	Weißlichtinterferometrie
WSP	Wendeschnidplatte
ZK	Zylinderkopf
ZOT	Zünd-OT
	(ZOT, zwischen Kompressions- und Arbeitstakt)

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
μ oder f	dimensionsloses Maß	Reibkoeffizient, Reibzahl
a_e	mm	radiale Zustellung
$a_{e,SL}$	mm	Zustellung Schichten
$a_{e,SR}$	mm	Zustellung Schruppen
a_p	mm	Schnitttiefe
C_1	W m ²	1. Strahlungskonstante
C_2	m K	2. Strahlungskonstante
D_{Korr}	mm	Durchmesserkorrektur
D_{min} / D_{max}	μ m	minimale / maximale Partikelgröße
D_{Soll}	mm	Solldurchmesser
D_{Start}	mm	Startdurchmesser
$D_{Zwischen}$	mm	Zwischendurchmesser
E_{Korr}	mm	Ellipsenkorrektur
F_c	N	Schnittkraft
F_{ca}	N	Schnittaxialkraft
F_{cn}	N	Anpresskraft
F_{ct}	N	Schnitttangentialkraft
F_m	N	Quotienten der Höchstkraft
F_N	N	Normalkraft
F_R	N	Reibkraft
F_z	N	Zustellkraft bzw. Zerspankraft
f_z	mm/z	Vorschub pro Schneide
g	-	Brennweite

I_{Foc}	mm	Fokusbildungsdistanz
L_{max}	N	maximal ertragbare Last
n	U/min	Drehzahl
$n_{\text{Ausfeuern}}$	-	Anzahl Ausfeuerumdrehungen
P_{Exp}	μs	Belichtungszeit zur Vermessung der Partikel-Leuchtschichten
p_n	MPa	Anpressdruck
R_{FH}	MPa	Haftzugfestigkeit
R_z	μm	gemittelte Rautiefe
$T_{\text{min}} / T_{\text{max}}$	$^{\circ}\text{C}$	minimale / maximale Partikeltemperatur
T_p	$^{\circ}\text{C}$	Partikeltemperatur
v	m/s	Geschwindigkeit
v_a	m/s	Axialgeschwindigkeit
VB	μm	Verschleißmarkenbreite
v_c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
v_{ca}	m/s	axiale Vorschubgeschwindigkeit
v_{cn}	m/s	Zustellgeschwindigkeit
v_{ct}	m/s	tangentiale Vorschubgeschwindigkeit
v_f	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
$v_{f,\text{Ausfeuern}}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit Ausfeuern
$v_{f,\text{SL}}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit Schichten
$v_{f,\text{SR}}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit Schuppen
$v_{\text{min}} / v_{\text{max}}$	m/s	minimale / maximale Partikelgeschwindigkeit
$V\text{-Öl-Honen}$	$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$	Ölrückhaltevolumen des Bearbeitungsprofils
$V\text{-Öl-Poren}$	$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$	Ölrückhaltevolumen des Vertiefungsprofils
v_p	m/s	Partikelgeschwindigkeit
α	$^{\circ}$	Kreuzungswinkel beim Honen
α	$^{\circ}$	Freiwinkel beim Drehen
β	$^{\circ}$	Schnittwinkel
β	-	Abbildungsmaßstab
β	$^{\circ}$	Keilwinkel
γ	$^{\circ}$	Spanwinkel
γ_f	$^{\circ}$	negativer Fasenspanwinkel
$\varepsilon_1, \varepsilon_2$	-	Emissionsgrade
κ	$^{\circ}$	Einstellwinkel
λ	nm	Wellenlänge