

# **Modellbildung und Simulation von Honprozessen für thermisch beschichtete Zylinderlaufbahnen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Sascha Kreter  
geboren am 15.10.1981 in Karaganda  
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 14.08.2018



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Doktorandentätigkeit in der Abteilung Bauteilbearbeitung bei der Daimler AG in Stuttgart. Die hochschulseitige Betreuung wurde vom Lehrstuhl für Zerspantechnik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg übernommen. Deshalb möchte ich mich zuallererst bei Herrn Prof. Bernhard Karpuschewski für die Ermöglichung dieser Arbeit und die wissenschaftliche Betreuung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Dr. Stefan Schweickert für seine ausgezeichnete Betreuung. Durch seine fachliche Unterstützung, sein Engagement und seine wertvollen Hinweise konnte diese Arbeit erfolgreich zum Abschluss gebracht werden. Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing. Klaus Geiger, der mich als Teamleiter während meiner Doktorandenzeit in jeglicher Hinsicht unterstützte.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Herren Thomas Kreisl und Günter Rau für die äußerst produktive Zusammenarbeit bedanken. Die konstruktiven Diskussionen über die Honttechnologie waren essentiell wichtig für das Gelingen dieser Arbeit. Zudem bedanke ich mich bei allen Mitarbeitern des Teams Feinbearbeitung und des Technikums für die sehr gute Arbeitsatmosphäre.

Abschließend möchte ich mich recht herzlich bei meiner Familie bedanken, deren Unterstützung ich mir während der Erstellung dieser Arbeit immer sicher sein konnte.

## Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation thematisiert den Honprozess von thermisch beschichteten Zylinderlaufbahnen. Betrachtet werden zunächst die elastischen Verformungen eines Zylinderkurbelgehäuses durch Bearbeitungskräfte. Diese Verformungen haben Formabweichungen aufgrund unterschiedlicher Steifigkeiten der Zylinderlaufbahn zur Folge. Mit Hilfe der Methode der finiten Elemente wird die am Honstein wirkende Normalkraft ermittelt und anschließend die Zylinderverformungen berechnet. Im Anschluss erfolgt die Verifikation der simulierten Ergebnisse durch entsprechende Experimente und Messungen. In einem weiteren Schritt werden sämtliche am Honstein wirkenden Kräfte durch geeignete Messtechniken erfasst und mit entsprechenden Maschinendaten kalibriert, so dass zukünftig Schnittkraftmessungen auf Basis der kalibrierten Daten durchgeführt werden können. Weiterhin werden für die Schneidstoffe Diamant und Siliziumkarbid die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen durch Regressionsmodelle ermittelt. Dabei werden für den Schneidstoff Diamant die Einflüsse der Honsteinspezifikation und der Maschinenparameter auf die Zielgrößen untersucht (Bearbeitungskräfte und Oberflächenrauigkeit). Für das erstmalig bei thermisch beschichteten Zylinderlaufbahnen eingesetzte Siliziumkarbid als Schneidstoff wird im Fertighonprozess durch geeignete Parametrierung die Problematik der hohen Hauptzeitstreuung analysiert. Für den letzten Prozessschritt, das kraftgesteuerte Glätthonen mit Siliziumkarbid, werden die Einflüsse der Maschinenparameter auf die Kennwerte der Endoberfläche untersucht. Abschließend werden auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit Optimierungsmaßnahmen für die Auslegung zukünftiger Honprozesse aufgezeigt.

## Abstract

This dissertation deals with the honing process of thermally coated cylinder liner surfaces. At first, the elastic deformations of a crankcase by machining forces are considered. These deformations result in shape deviations caused by different stiffnesses of the cylinder. Using the finite element method, the normal forces acting on the honing stone are determined and afterwards the cylinder deformations are calculated. Subsequently, the simulated results are verified by appropriate experiments and measurements. In a further step, the acting forces on the honing stone are logged by suitable measuring techniques and calibrated with corresponding machine data, so that in future cutting force measurements can be executed on the basis of the calibrated data. Furthermore, the cause-and-effect interrelations between the input and output parameters for the cutting materials diamond and silicon carbide are determined by regression models. Though, the influences of the honing stone specification and the machine parameters on the target parameters (machining forces and surface roughness) are investigated for the diamond material. For the cutting material silicon carbide, used for the first time in the case of thermally coated cylinder liner surfaces, the problem of high main-time variation is solved in the finish process by appropriate parameterization. For the last process step, the force-controlled smoothing with silicon carbide, the influences of the machine parameters on the characteristics of the finished surface are analyzed. Finally, on the basis of the findings of this work, optimization measures for the design of future honing processes will be presented.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Verwendete Formelzeichen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Verwendete Abkürzungen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b> .....	<b>5</b>
2.1 Fertigungsverfahren Honen .....	5
2.1.1 Kinematik und Bearbeitungskräfte beim Honen .....	6
2.1.2 Einflussgrößen und Kenngrößen des Honprozesses .....	9
2.1.3 Spanbildung und Verschleißmechanismen .....	11
2.1.4 Schneidstoffe und Bindungssysteme .....	14
2.2 Honwerkzeuge und Zustellsysteme .....	18
2.3 Zylinderlaufbahntechnologien .....	20
2.4 NANOSLIDE-Prozesskette .....	23
2.5 Modellierung und Simulation von Hon- und Schleifprozessen .....	27
2.5.1 Ansätze für das Honen .....	28
2.5.2 Ansätze für das Schleifen .....	29
2.5.3 Fazit .....	35
2.6 Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE) .....	35
2.6.1 Versuchspläne .....	37
2.6.2 Ablauf einer DoE-Versuchsauswertung in Minitab .....	38

---

<b>3 Aufgabenstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>40</b>
<b>4 Rahmenbedingungen für die Bearbeitungsversuche</b> .....	<b>42</b>
4.1 Honmaschinen .....	42
4.1.1 Honmaschine Nagel VARIOHONE 2 .....	42
4.1.2 Honmaschine Gehring Z400-125.....	43
4.2 Honwerkzeuge .....	44
4.2.1 Fertighonwerkzeug Fa. Nagel.....	44
4.2.2 Fertighonwerkzeug Fa. DFH.....	45
4.3 Versuchswerkstücke und Vorrichtungen .....	46
4.3.1 OM654 Zylinderkurbelgehäuse.....	46
4.3.2 M133 Zylinderkurbelgehäuse .....	46
4.3.3 Vorrichtung für Versuchsbuchsen.....	47
4.4 Messequipment und Messtechnik zur Qualitätssicherung .....	48
4.4.1 Oberflächenkennwerte für thermische Spritzschichten .....	48
4.4.2 Oberflächenmessgerät Hommel T8000 .....	52
4.4.3 Weißlichtinterferometrie.....	53
4.4.4 Formmessgerät V-Incometer .....	54
<b>5 Verformungssimulation am Zylinderkurbelgehäuse</b> .....	<b>56</b>
5.1 Theoretische Grundlagen und Hypothesen .....	56
5.2 Modellierung des Honprozesses.....	57
5.3 Berechnung der Zylinderverformungen durch Bearbeitungskräfte.....	60
5.4 Berechnungsergebnisse und Interpretation .....	63
5.5 Fazit .....	66
<b>6 Modellbildung für Schneidstoff Diamant</b> .....	<b>68</b>
6.1 Erfassung und Kalibrierung von Bearbeitungskräften .....	68
6.1.1 Kalibrierung der tangentialen Kraftkomponente $F_{ct}$ .....	69
6.1.2 Kalibrierung der axialen Kraftkomponente $F_{ca}$ .....	71
6.2 Versuche zur Ableitung von Regressionsmodellen .....	72

---

6.3 Versuchsergebnisse .....	73
6.3.1 Herleitung der Axialkraft über die Geschwindigkeitskomponenten .....	75
6.3.2 Ergebnisse für Normalkraft $F_{cn}$ .....	76
6.3.3 Ergebnisse für Axialkraft $F_{ca}$ .....	79
6.3.4 Ergebnisse für Tangentialkraft $F_{ct}$ .....	81
6.3.5 Ergebnisse für Oberflächenrauigkeit .....	83
6.4 Fazit .....	85
<b>7 Modellbildung für Schneidstoff Siliziumkarbid .....</b>	<b>87</b>
7.1 Problematik der Hauptzeitstreuung im Fertighonprozess .....	88
7.1.1 Ursachenanalyse mit Hilfe von Prozessdaten .....	89
7.2 Optimierung der Schneidfähigkeit durch Integration neuer Parameter .....	93
7.2.1 Normalkraft bei Prozessstart und Eilvorschubgeschwindigkeit .....	93
7.2.2 Minimale und maximale Verschleißkompensation .....	96
7.3 Qualifizierung eines Honsteins für den Fertighonprozess .....	98
7.3.1 Versuchsergebnisse für Honstein SC220 .....	99
7.3.2 Versuchsergebnisse für Honstein SC180_1 .....	102
7.3.3 Versuchsergebnisse für Honstein SC180_2 .....	107
7.4 Modellbildung für den Glätthonprozess .....	110
7.4.1 Statistische Versuchsplanung (DoE) .....	110
7.4.2 Auswertung und Modellbildung für den Kennwert V-Öl-Honen .....	112
7.4.3 Auswertung und Modellbildung für den Kennwert V-Öl-Poren .....	114
7.4.4 Auswertung und Modellbildung für den Kennwert Porenlängenanteil .....	115
7.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Siliziumkarbidhonung .....	117
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>120</b>
<b>9 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>



## Verwendete Formelzeichen

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
$a_p$	Schnitttiefe	[mm]
$d$	Werkstückdurchmesser	[mm]
$f_z$	Vorschub	[mm/U]
$F_{ca}$	Axialkraft	[N]
$F_{ct}$	Tangentialkraft	[N]
$F_{cn}$ bzw. $F_{cN}$	Normalkraft	[N]
$F_{Start}$	Normalkraft bei Prozessstart	[N]
$F_{Zustell}$	Kraft an der Zustelleinheit	[N]
$FK_B$	Fertigungskosten je Bohrung	[€]
$K_S$	Schneidstoffkosten	[€]
$K_{WA}$	Werkzeugaufbereitungskosten	[€]
$L$	Messstrecke eines Tastschriebs	[mm]
$L_{1,2,3,4}$	Porenlänge 1,2,3,4	[mm]
MAXkorr	maximale Verschleißkompensation	[ $\mu\text{m}$ ]
MINkorr	minimale Verschleißkompensation	[ $\mu\text{m}$ ]
$M_S$	direktes Spindelmoment	[%]
$M_Z$	Drehmoment (Kraftmessplattform)	[Nm]
$n$	Drehzahl	[U/min]
$p_{me}$	effektiver Mitteldruck eines Hubkolbenmotors	[bar]
$p_n$	Anpressdruck	[N/mm <sup>2</sup> ]
$R^2$	Korrelationskoeffizient	-
R6sB	Rauigkeit des Bearbeitungsprofils	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_k$	Kernrautiefe	[ $\mu\text{m}$ ]
$R_z$	gemittelte Rautiefe	[ $\mu\text{m}$ ]
R-Qd(kor)	Erklärungsrate eines Regressionsmodells	[%]
$SM$	Standmenge	[Bohrungen]
$t_H$	Hauptzeit	[s]
$V_{Abtrag}$	realer Abtrag	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$V_{mech}$	mechanische Zustellung	[ $\mu\text{m/s}$ ]

---

$v_c$	Schnittgeschwindigkeit	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$v_{ca}$	axiale Vorschubgeschwindigkeit	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$v_{cN}$	normale/radiale Zustellgeschwindigkeit	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$v_{ct}$	tangentiale Vorschubgeschwindigkeit	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$V_f$	Vorschubbewegung	[mm/min]
$V_{ist}$	Ist-Zustellung	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$V_{soll}$	Soll-Zustellung	[ $\mu\text{m/s}$ ]
V-Öl-Honen	Ölrückhaltevolumen des Bearbeitungsprofils	[ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]
V-Öl-Poren	Ölrückhaltevolumen des Vertiefungsprofils	[ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]
$z$	Anzahl Honsteine	[-]
$Z_{schw}$	Anhonkraft	[N]
$Z_{vgr}$	Eilvorschubgeschwindigkeit	[ $\mu\text{m/s}$ ]
$\alpha$	Honwinkel	[°]
$\beta$	Richtungswinkel	[°]

## Verwendete Abkürzungen

<b>Kurzzeichen</b>	<b>Erklärung</b>
Al	Aluminium
APS	Atmosphärisches Plasmaspritzen
CBN	kubisches Bornitrid
C <sub>mk</sub>	kritischer Maschinenfähigkeitsindex
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CP	center point =Zentralpunkt
Cu	Kupfer
CVD	chemical vapour deposition = chemische Gasphasenabscheidung
DoE	Design of Experiments = statistische Versuchsplanung
EMZ	elektromechanische Zustellung
FEM	finite Elemente Methode
FH	Fertighonen
GH	Glätthonen
GJL	Gusseisen mit Lamellengrafit
GS	Getriebeseite
H <sub>0</sub>	Nullhypothese
HAZ	hydraulische Zustellung
H <sub>a</sub>	Alternativhypothese
HVOF	High Velocity Oxygen Fuel = Hochgeschwindigkeitsflammspritzen
KGH	Kurbelgehäuse
KNN	künstlich neuronales Netz
KSS	Kühlschmierstoff
LDS	Lichtbogendrahtspritzen
M133	4-Zylinder-Ottomotor der Fa. AMG
M156	8-Zylinder-Ottomotor der Fa. AMG
MDM	Molekulardynamische Modelle
Mg	Magnesium
MPa	Megapascal
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus

---

NMRP	Nissan Mechanical Roughening Process = Mechanisches Aufrauverfahren der Fa. Nissan
OM654	4-Zylinder-Dieselmotor von Mercedes-Benz
PTWA	Plasma-Transferred-Wire-Arc = Plasmaspritzverfahren mit drahtförmigem Spritzzusatz
PVD	physical vapour deposition = physikalische Gasphasenabscheidung
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SRV	Schwing-Reib-Verschleiß
SS	Steuerseite
VH	Vorhonen
Vol.-%	Volumenprozent
WLI	Weißlichtinterferometrie
Z1,2,3,4	Zylinder 1,2,3,4
ZH1	Zwischenhonen 1
ZH2	Zwischenhonen 2

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Aufschlüsselung der Kraftstoffenergie eines V6-Ottomotors (links); Aufteilung der Motorreibung anhand der wesentlichen Baugruppen (rechts) [Scho13] .....	1
Bild 1.2: Reibleistungsvorteil der NANOSLIDE-Oberfläche im Vergleich zur Grauguss-Feinhonung [Scho13].....	3
Bild 2.1: Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN09] .....	5
Bild 2.2: Kinematik beim Langhubhonen mit Kreuzstruktur [Schö02] .....	7
Bild 2.3: Kraftkomponenten beim Langhubhonen [Pauc08] .....	8
Bild 2.4: Eingangs,- Prozess- und Ausgangsgrößen des Honprozesses [Kloc05].....	9
Bild 2.5: Spanbildung beim Honen [Arde00].....	11
Bild 2.6: Verschleißmechanismen am Schneidkorn [Arde00] .....	12
Bild 2.7: REM - Aufnahmen von Diamant- und SiC-Honleiste .....	15
Bild 2.8: Dreistoffdiagramm für keramische Honleisten, Diamant- und CBN- Honleisten [Flor10b] .....	16
Bild 2.9: Beispielhafte Honleistenbezeichnung (Korund als Kornwerkstoff) [Frit08] ..	17
Bild 2.10: Freiheitsgrade des Honwerkzeugs [Flor10a] .....	18
Bild 2.11: Grundlegender Aufbau eines Honwerkzeugs [Flor92] .....	19
Bild 2.12: Tribologischer Zusammenhang im Kolben-Zylinderlaufbahn-System nach [Flor07] .....	21
Bild 2.13: Zylinderlaufbahntechnologien für Aluminium-Kurbelgehäuse [Gand11] ....	22
Bild 2.14: Prozessschritte der NANOSLIDE-Technologie .....	24
Bild 2.15: Schematische Darstellung des NMRP-Prozesses [Niss09, Wenz15].....	25
Bild 2.16: Aufbau eines Lichtbogendraht-Spritzsystems [Wern11] .....	26
Bild 2.17: Entstehung und Aufbau einer Spritzschicht [Sieg95].....	27
Bild 2.18: Modellkategorien für Schleifprozesse nach [Brin06].....	30
Bild 2.19: Darstellung der Residuen in einer Regression [Sche97] .....	37
Bild 2.20: Ablauf einer DoE-Auswertung (schematisch) .....	39
Bild 3.1: Themenschwerpunkte der Dissertation .....	41
Bild 4.1: Nagel Honmaschine VARIOHONE 2 VSM 8-60 SV-NC .....	42
Bild 4.2: Gehring Honmaschine Z400-125 .....	43
Bild 4.3: Doppelaufweitendes Fertighonwerkzeug Fa. Nagel .....	45

Bild 4.4: Doppelaufweitendes Fertighonwerkzeug Fa. DFH.....	45
Bild 4.5: Versuchswerkstück KGH OM654.....	46
Bild 4.6: Versuchswerkstück KGH M133.....	47
Bild 4.7: Versuchsaufbau zur Kalibrierung von $F_{ca}$ und $F_{ct}$ .....	48
Bild 4.8: Strukturtrennung des Oberflächentastschriebs [Daim14].....	49
Bild 4.9: Visualisierung des Algorithmus zur Strukturtrennung [Daim14] .....	50
Bild 4.10: Prinzipdarstellung der simulierten Kolbenringbewegung auf einer Oberfläche .....	51
Bild 4.11: Darstellung der Messstrecken in der Zylinderbohrung .....	52
Bild 4.12: Rauheitsmessgerät Hommel T8000.....	53
Bild 4.13: Schematischer Aufbau eines Weißlichtinterferometers (links) [Heri06]; WLI- Aufnahme einer Diamanthonung (rechts) .....	54
Bild 4.14: Messsystem V-Incometer (links: eingebauter Messzustand, rechts: Detailansicht).....	55
Bild 5.1: Wandstärkenanalyse eines Zylinderkurbelgehäuses (Schnittdarstellung) ..	57
Bild 5.2: Verformung durch Bearbeitungskräfte (Prinzipdarstellung).....	57
Bild 5.3: Komponenten des Honprozessmodells .....	58
Bild 5.4: Berechnung der Honsteinkräfte .....	59
Bild 5.5: Messsystem zur Kalibrierung der Honsteinkraft.....	59
Bild 5.6: Einfluss der LDS-Schicht auf die Verformungen .....	60
Bild 5.7: Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Rundheitsabweichungen.....	61
Bild 5.8: Rundheitsabweichungen von 5 Kurbelgehäusen (Mittelwerte) .....	61
Bild 5.9: Honprozessmodellierung für Zylinder 1 .....	62
Bild 5.10: Gegenüberstellung von Messung und Simulation, Zylinder 1 .....	63
Bild 5.11: Wandstärkenanalyse und Formmessung, Zylinder 1 .....	64
Bild 5.12: Gegenüberstellung von Messung und Simulation, Zylinder 2 und 3 .....	64
Bild 5.13: Wandstärkenanalyse Zylinder 2 und 3.....	65
Bild 5.14: Gegenüberstellung von Messung und Simulation, Zylinder 4 .....	65
Bild 5.15: Wandstärkenanalyse und Formmessung, Zylinder 4 .....	66
Bild 6.1: Auszug aus dem Programm zur Prozessdatenvisualisierung (ScopeView)	68
Bild 6.2: Verlauf Spindelmoment [%] und Drehmoment an der Messplattform [Nm] .	70
Bild 6.3: Korrelation direktes Spindelmoment [%] und Drehmoment [Nm].....	70
Bild 6.4: Verlauf Hubmoment [%] und Axialkraft an der Messplattform[N] .....	72
Bild 6.5: Prozesskräfte je Leiste während der Bearbeitung.....	74

Bild 6.6: Gegenüberstellung von $v_{\text{soll}}$ und $v_{\text{ist}}$ [ $\mu\text{m/s}$ ] .....	75
Bild 6.7: Korrelation zwischen Kraft- und Geschwindigkeitsverhältnissen unterschiedlicher Honsteine .....	76
Bild 6.8: Haupteffektdiagramm für Normalkraft.....	77
Bild 6.9: Wirkungsflächendiagramme für die Normalkraft.....	78
Bild 6.10: Residuendiagramme des Modells .....	79
Bild 6.11: Haupteffektdiagramm für die Axialkraft .....	80
Bild 6.12: Wirkungsflächendiagramme für die Axialkraft.....	81
Bild 6.13: Haupteffektdiagramm für die Tangentialkraft .....	82
Bild 6.14: Wirkungsflächendiagramme für die Tangentialkraft .....	83
Bild 6.15: Haupteffektdiagramm für die Oberflächenrauigkeit .....	84
Bild 6.16: Wirkungsflächendiagramme für die Oberflächenrauigkeit .....	85
Bild 7.1: Übersicht Prozessketten.....	87
Bild 7.2: Verlauf der Hauptzeiten des Fertighonprozesses (SC220).....	88
Bild 7.3: Charakteristischer Kraftverlauf beim Fertighonen (1 KGH) .....	89
Bild 7.4: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation des Fertighonprozesses.....	90
Bild 7.5: Honzeit und EMZ-Verschleißkompensation im Fertighonprozess mehrerer Zylinderkurbelgehäuse .....	91
Bild 7.6: Grafische Darstellung von Systemverspannung, Verschleiß und Schneidverhalten.....	92
Bild 7.7: Grafische Darstellung der neuen Parameter $F_{\text{Start}}$ und $z_{\text{vgr}}$ .....	93
Bild 7.8: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation mit neuen Parametern $F_{\text{Start}}$ und $z_{\text{vgr}}$ im Fertighonprozess.....	94
Bild 7.9: Kraftverlauf nach optimierter $F_{\text{Start}}$ (KGH 4, Z1-Z4).....	95
Bild 7.10: Kraftverlauf nach optimierter $F_{\text{Start}}$ (KGH 5, Z1-Z4).....	95
Bild 7.11: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation mit neuer Parametrierung ..	97
Bild 7.12: Kraftverlauf nach Integration der Parameter MINkorr/MAXkorr und $F_{\text{Start}}/z_{\text{vgr}}$ (KGH 9) .....	97
Bild 7.13: Kraftverlauf für Honstein SC220 (KGH 8).....	100
Bild 7.14: Vergleich von WLI-Aufnahmen einer SiC-Honung (links) und einer Diamanthonung (rechts).....	101
Bild 7.15: Weitere WLI-Aufnahmen der Siliziumkarbid-Honung (Honsteinkombination: SC220/SC500) .....	102
Bild 7.16: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation für Honstein SC180_1 .....	103

---

Bild 7.17: Kraftverlauf der ersten 4 Zylinderbohrungen.....	104
Bild 7.18: Kraftverlauf für KGH 6 (oben) und 7 (unten) .....	105
Bild 7.19: WLI-Aufnahmen der Honsteinkombination SC180_1/SC500.....	107
Bild 7.20: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation für Honstein SC180_2.....	108
Bild 7.21: Kraftverlauf KGH 6 (oben) und 7 (unten) .....	109
Bild 7.22: Haupteffektdiagramm für V-Öl-Honen.....	113
Bild 7.23: Wirkungsflächendiagramm für den Kennwert V-Öl-Honen.....	114
Bild 7.24: Tastschrieb einer Messstrecke mit Porenlängenanteil = 4,94 % (Tangentialgeschw. = 78 m/min; Glättkraft = 200 N; Glättzeit = 20 s) .....	116
Bild 7.25: Tastschrieb einer Messstrecke mit Porenlängenanteil = 0,95 % (Tangentialgeschw. = 78 m/min; Glättkraft = 600 N; Glättzeit = 12 s) .....	116
Bild 7.26: Prozentuale Kosten für Diamant- und SiC-Werkzeug .....	118
Bild 7.27: Prozentuale Fertigungskosten/Bohrung für Diamant- und SiC- Werkzeug.....	119



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Übersicht der wichtigsten Beiträge zur Analyse der Wirkung der Stellgrößen bei der Honbearbeitung.....	10
Tabelle 2.2: Verschleißverhalten von Bindung und Korn [Flor10b] .....	13
Tabelle 2.3: Knoophärte der 4 gängigen Schneidstoffe [Kloc05] .....	14
Tabelle 2.4: Eigenschaften der Zustellsysteme HAZ und EMZ.....	20
Tabelle 4.1: Maschinendaten Nagel VARIOHONE 2 VSM 8-60 SV-NC .....	43
Tabelle 4.2: Maschinendaten Gehring Z400-125.....	44
Tabelle 6.1: Eingangsgrößen für die Versuchsreihen .....	73
Tabelle 6.2: Auszug aus dem Minitab-Ergebnisprotokoll für Normalkraft.....	76
Tabelle 6.3: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Normalkraft.....	77
Tabelle 6.4: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Axialkraft.....	79
Tabelle 6.5: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Tangentialkraft .....	82
Tabelle 6.6: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Oberflächenrauigkeit.....	84
Tabelle 7.1: Zielgrößen für die Versuche zur Qualifizierung der Fertighonsteine.....	98
Tabelle 7.2: Eingangsgrößen für den Fertighon-/Glätthonprozess; SC220/SC500....	99
Tabelle 7.3: Ausgangsgrößen Endoberfläche; Honsteine SC220/SC500 .....	100
Tabelle 7.4: Eingangsgrößen für den Fertighon-/Glätthonprozess; SC180_1/SC500 .....	103
Tabelle 7.5: Ausgangsgrößen Endoberfläche; Honsteine SC180_1/SC500 .....	106
Tabelle 7.6: Eingangsgrößen für den Fertighon-/Glätthonprozess; SC180_2/SC500 .....	107
Tabelle 7.7: Ausgangsgrößen Endoberfläche; Honsteine SC180_2/SC500 .....	109
Tabelle 7.8: Versuchsraum der Eingangsgrößen.....	111
Tabelle 7.9: Einstellungen der Eingangsgrößen für die DoE .....	111
Tabelle 7.10: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für V-Öl-Honen.....	112
Tabelle 7.11: Auszug aus dem Minitab-Ergebnisprotokoll für V-Öl-Poren.....	115
Tabelle 7.12: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Porenlängenanteil	115
Tabelle 7.13: Arbeitsschritte bei der Werkzeugaufbereitung.....	118



# 1 Einleitung

Innovationen sind in Zeiten der Globalisierung und der steigenden Anzahl an Mitbewerbern essentiell, um ein Unternehmen langfristig auf Erfolgskurs zu halten. Ebenso werden die Unternehmen durch neue Gesetze und Normen unter Druck gesetzt, Innovationen weiter voranzutreiben. Aufgrund verschärfter Grenzwerte für CO<sub>2</sub>-Emissionen und der absehbaren Verknappung der Rohölvorräte treten Antriebskonzepte, wie der batteriebetriebene Elektromotor oder die Energieerzeugung durch Brennstoffzellen, in den Fokus der Automobilhersteller. Trotz zunehmender Elektrifizierung des Antriebstrangs werden Verbrennungsmotoren auch in den nächsten zwei bis drei Jahrzehnten von hoher Relevanz bei der Schaffung individueller Mobilität sein. Ein großes Potential zur Reduzierung von Kraftstoffverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen wird der Reibungsminimierung im Antriebsstrang zugeschrieben. Bild 1.1 illustriert, dass 25 % der eingesetzten Kraftstoffenergie im Motor zur Überwindung der Reibung aufgewandt wird. Daran hat die Kolbengruppe mit 48 % den größten Einzelanteil. Die Reibungsminimierung im Kolben-Laufbahnsystem birgt also ein großes Potenzial, um den Kraftstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren.

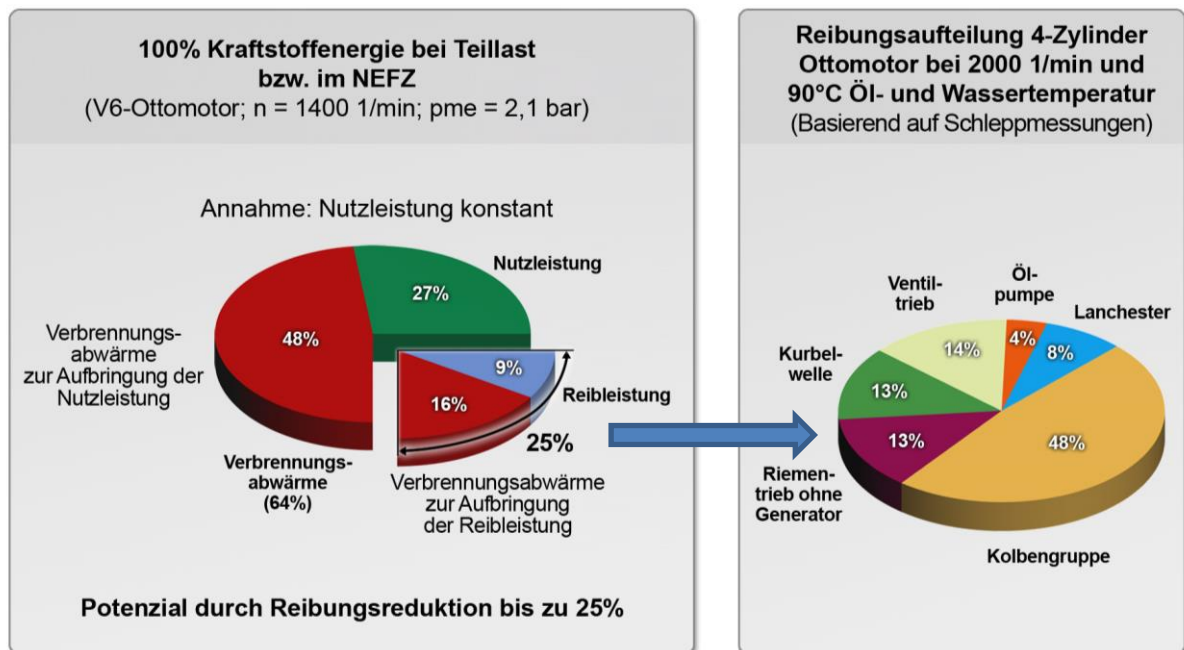


Bild 1.1: Aufschlüsselung der Kraftstoffenergie eines V6-Ottomotors (links); Aufteilung der Motorreibung anhand der wesentlichen Baugruppen (rechts) [Scho13]

Eisenbasierte Kurbelgehäuse aus Grauguss stellten lange Zeit den Stand der Technik auf dem Gebiet der Zylinderlaufbahnen dar. Diese eignen sich mit einer entsprechenden Honung direkt als Tribopartner der Kolbengruppe. Um dem Aspekt des Leichtbaus gerecht zu werden, kommen verstärkt Kurbelgehäuse aus Vollaluminium zum Einsatz. Da dieser Werkstoff aufgrund seiner Fressneigung und seinem geringen Verschleißwiderstand nicht als direkter Tribopartner geeignet ist, werden Buchsen aus Grauguss oder Aluminium mit Siliziumausscheidung als Laufbahn eingegossen [Böhm12].

Optimierungen an Funktionsoberflächen von Zylinderlaufbahnen hatten bei Mercedes-Benz im Wesentlichen die sichere Ölversorgung des Kolben-Ringsystems im Einlauf und über hohe Laufleistungen zum Ziel. Das Ergebnis waren Honoberflächen mit Strukturhöhen größer  $2,5 \mu\text{m}$ , die in der Vergangenheit den Standard bei Otto- und Dieselmotoren darstellten. Als neben den Funktionsaspekten wie Fressneigung, Ölverbrauch und Laufbahnverschleiß auch die Reibleistung immer mehr an Bedeutung gewann, wurden Honungen auf eisenbasierten Laufbahnwerkstoffen weiterentwickelt. Es wurden sogenannte Plateauhonungen mit einer glatten Deckstruktur und tieferen Riefen in der Grundhonung eingeführt. Bei Mercedes-Benz wurde ein anderer Ansatz verfolgt. Hier wurde die konventionelle Honung kontinuierlich zur Fein- bzw. Feinsthonung weiterentwickelt. Dabei zeigte sich, dass auch sehr glatte Oberflächenstrukturen ( $0,5\text{-}1,6 \mu\text{m}$ ) eine sichere Funktion bei höchsten Laufleistungen gewährleisten [Böhm12].

Ein Nachteil derartiger Buchsen-Lösungen mit optimierten Honungen ist der erforderliche Bauraum, der ein entsprechendes Mehrgewicht zur Folge hat. Des Weiteren kann das System durch ein weiteres Herabsetzen des Ölrückhaltevolumens, insbesondere bei Verwendung von niederviskosen Motorenölen, an seine physikalischen Grenzen kommen. Eine weitere Reduzierung der Reibleistung durch erneute Herabsetzung der Strukturhöhe, bei gleichbleibender Gewährleistung des benötigten Ölrückhaltevolumens, ist daher nur durch einen Technologiewechsel realisierbar [Böhm12].

Thermisch beschichtete Zylinderlaufbahnen sind der aktuelle Trend bei vielen Automobilherstellern, die damit das Ziel verfolgen, die Gewichtsreduzierung weiter voranzutreiben sowie die Reibung in der Kolbengruppe zu senken. Mit der NANOSLIDE-Oberfläche ist auch die Daimler AG bestrebt, die erwähnten Potenziale zu erschließen. Bei dieser Technologie werden die Zylinderlaufbahnen durch das Lichtbogen drahtspritzen (LDS) mit einer Eisen-Kohlenstoff-Legierung beschichtet. Die entstehende charakteristische Porosität in der Oberfläche erzeugt ein Ölrückhaltevolumen, so dass die betriebssichere Verwendung einer sehr feinen Honstruktur ermöglicht wird. Das Ergebnis ist eine gleichzeitig verschleiß- und reibungsarme Oberfläche mit sehr geringer Fressneigung. Der Reibungsvorteil im Vergleich zu einer bereits optimierten Grauguss-Feinhonung beträgt bei einem V6-Motor bis zu 50 % und stellt damit ein CO<sub>2</sub>-Potenzial von circa 3 % bei einem gleichzeitigen Gewichtsvorteil bis zu 4,3 kg dar, siehe Bild 1.2 [Scho13].

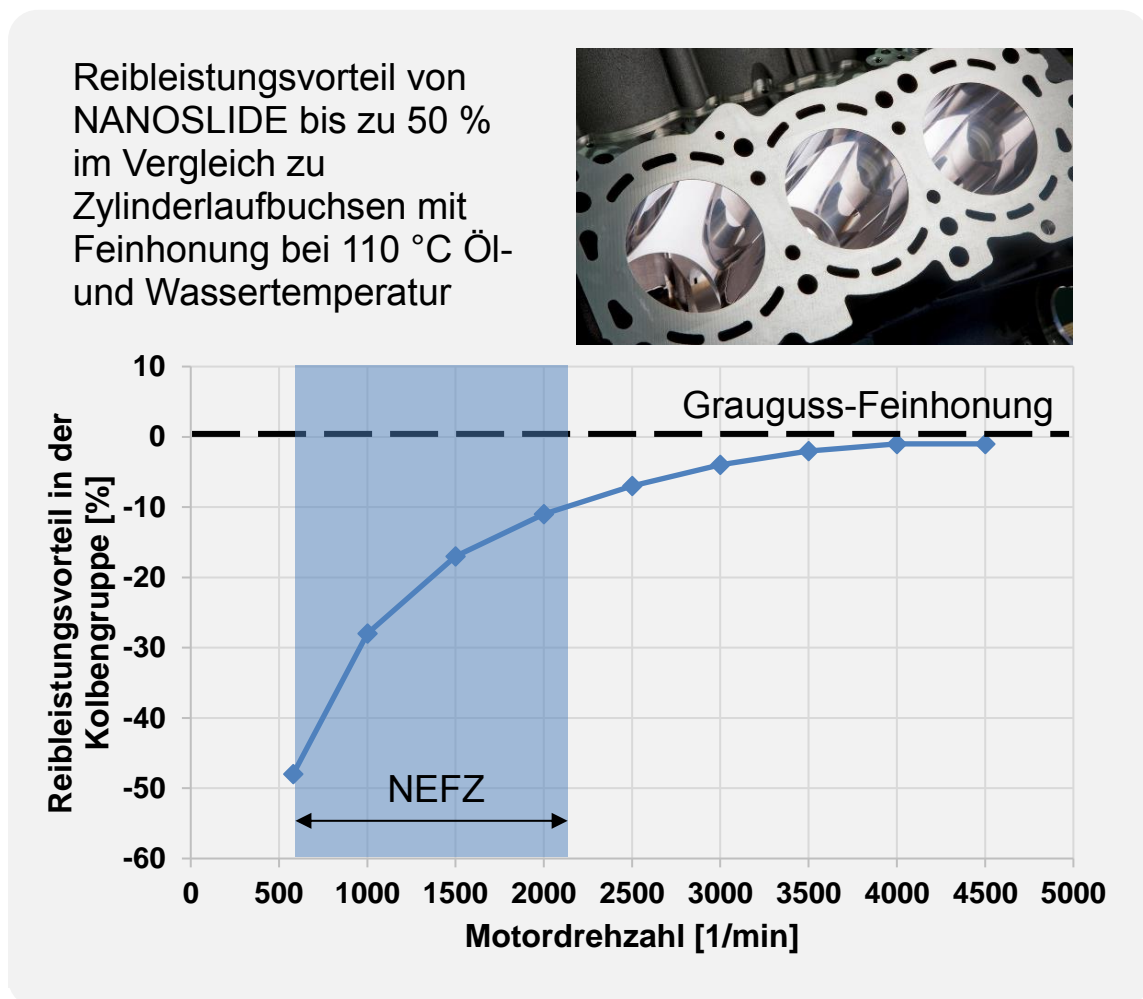


Bild 1.2: Reibleistungsvorteil der NANOSLIDE-Oberfläche im Vergleich zur Grauguss-Feinhonung [Scho13]

Die aktuelle Entwicklung hin zu Beschichtungstechnologien stellt auch hohe Anforderungen an den Honprozess eines Kurbelgehäuses. Harte Beschichtungswerkstoffe, feinere Oberflächen sowie dünnere Wandstärken müssen bei der Honprozessauslegung berücksichtigt werden. Dies macht die Anpassung der Eingangsgrößen des Honprozesses notwendig, um in einer Großserienfertigung das erforderliche Bearbeitungsergebnis (Qualität) in einer vom Linientakt abgeleiteten Hauptzeit sowie unter Berücksichtigung der laufenden Fertigungskosten zu erreichen.

Die Einstellung der Eingangsgrößen eines Honprozesses basiert bisher größtenteils auf Experten- und Erfahrungswissen. Gegenstand dieser Arbeit ist die Ermittlung der Ursache-Wirkungszusammenhänge beim Honen thermisch beschichteter Zylinderlaufbahnen durch Modellbildung und Simulation. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen einen Beitrag dazu leisten, optimale Eingangsgrößen zu ermitteln, den Entwicklungsaufwand zu reduzieren sowie eine systematische Vorgehensweise bei der Entwicklung zukünftiger Honprozessketten abzuleiten.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

In dem vorliegenden Kapitel werden die für das Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen erläutert und der Stand der Technik dargestellt.

### 2.1 Fertigungsverfahren Honen

Nach DIN 8589-14 wird das Honen wie folgt definiert: „Spanen mit geometrisch unbestimmten Schneiden, wobei die vielschneidigen Werkzeuge eine aus zwei Komponenten bestehende Schnittbewegung ausführen, von denen mindestens eine Komponente hin- und hergehend ist, so dass die bearbeitete Oberfläche auch definiert überkreuzende Spuren aufweist“ [DIN09]. Innerhalb des Ordnungssystems der Fertigungsverfahren gehört das Honen nach DIN 8580 zu den trennenden Verfahren bzw. zum Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide, siehe Bild 2.1 [DIN09].

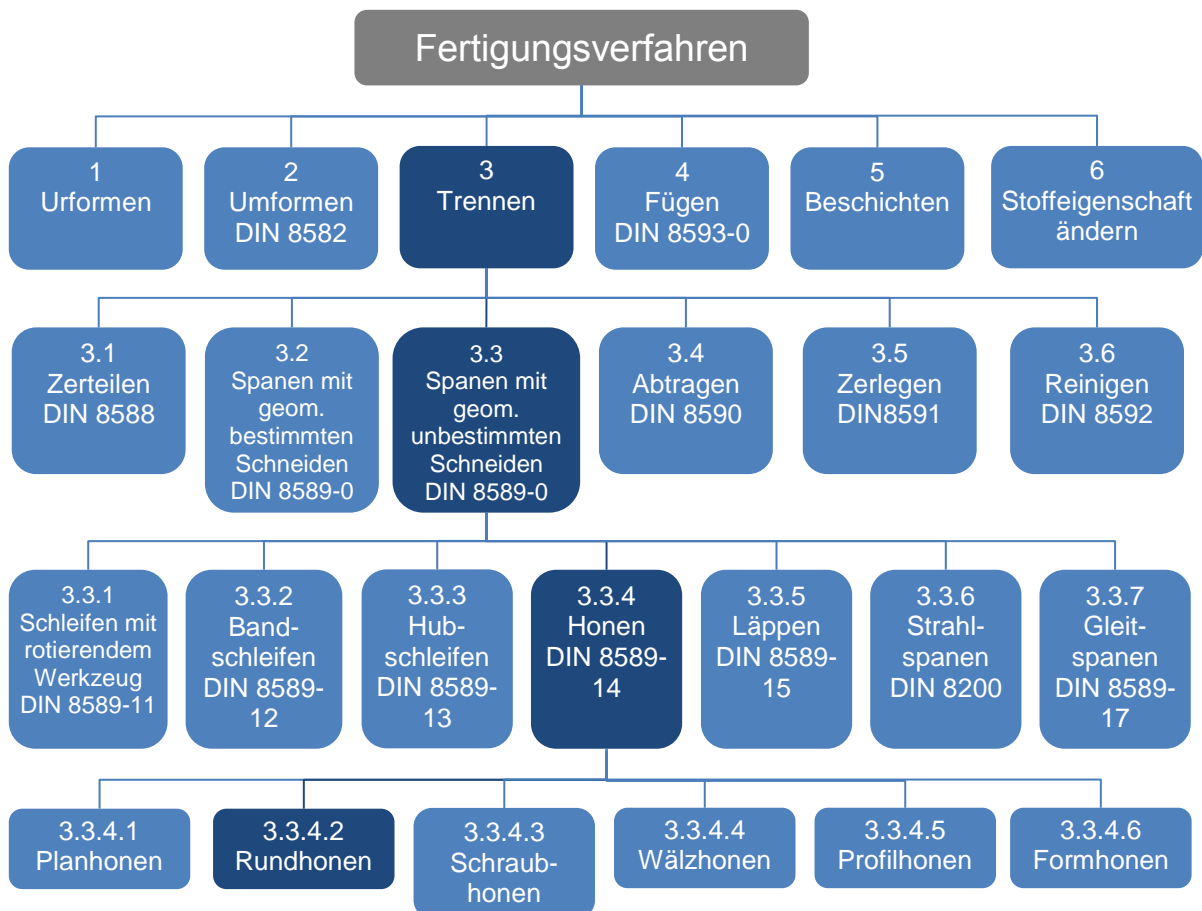


Bild 2.1: Fertigungsverfahren nach DIN 8580 [DIN09]

Ähnlich dem Schleifen nutzt das Honen ein Werkzeug aus gebundenem Korn zur spanenden Bearbeitung der Oberfläche eines Werkstücks, wobei der Werkstoff unter ständiger Flächenberührung abgetragen wird. Das Verfahren zielt auf die Verbesserung der Form-, Maß- und Oberflächengüte des Werkstücks ab [Frit08, Riss12]. Eine weitere Unterteilung erfolgt in Bezug auf die Form der erzeugten Fläche (Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formhonen), die Art der Schnittbewegung (Langhub, Kurzhub) und die Lage der Bearbeitungsstelle am Werkstück (außen, innen) [DIN09].

Beim Langhubhonen wird die axiale Hub- und Drehbewegung über das Honwerkzeug ausgeführt, wobei das Verfahren meist zur Innenbearbeitung von Bohrungen eingesetzt wird. Hingegen wird beim Kurzhubhonen die Drehbewegung über das Werkstück und die axiale, schwingende Kurzhubbewegung über das Werkzeug ausgeführt. Durch das Kurzhubhonen kann die Oberflächenbearbeitung unterschiedlicher Bauteile wie Wellen, Wälzkörper oder Wälzlagerringe erfolgen [Pauc08, Schö02].

Ein Honprozess gliedert sich überwiegend in eine Vorhonstufe mit größerem Werkstoffabtrag, mehrere Zwischenhonstufen sowie eine oder mehrere Fertighonstufen, bei der die Endform mit der geforderten Formgenauigkeit und Oberflächengüte erreicht wird [Pauc08]. Aufgrund der Themenstellung dieser Arbeit werden im Nachfolgenden die Grundlagen des Rundhonens bzw. des Langhub-Innenhonens erläutert.

### 2.1.1 Kinematik und Bearbeitungskräfte beim Honen

Die Bewegungen beim Honen zwischen Werkzeug und Werkstück können in drei zueinander rechtwinklige (orthogonale) Geschwindigkeitskomponenten zerlegt werden. Dabei sind sowohl die axiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ca}$  sowie die tangentielle Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ct}$ , die der Umfangsgeschwindigkeit entspricht, parallel zur Werkstückoberfläche und die Zustellgeschwindigkeit  $v_{cN}$  senkrecht zu dieser. Die Schnittgeschwindigkeit ist die Resultierende der drei unabhängig voneinander einstellbaren Einzelkomponenten (Formel 2.1). Damit ist das Honen eine Überlagerung aus einer Dreh-, Hub- und Zustellbewegung [Kloc05].



$$v_c = \sqrt{v_{ca}^2 + v_{ct}^2 + v_{cN}^2} \quad (2.1)$$

Da das Honen ein Feinbearbeitungsverfahren mit dem Ziel ist, die Form, die Maßgenauigkeit und die Oberflächengüte des Werkstücks zu verbessern, erfolgt es hauptsächlich im Anschluss an ein vorangegangenes Bearbeitungsverfahren. Aufgrund des geringen Spanvolumens ist die Zustellgeschwindigkeit  $v_{cN}$  gegenüber der tangentialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ct}$  sowie der Axialgeschwindigkeit  $v_{ca}$  sehr klein und kann somit vernachlässigt werden. Daraus ergibt sich für die Schnittgeschwindigkeit annähernd folgender Zusammenhang [Kloc05]:

$$v_c \approx \sqrt{v_{ca}^2 + v_{ct}^2} \quad (2.2)$$

Abgesehen von den Umkehrpositionen des Werkzeugs am Anfang bzw. Ende des Werkstücks sind die Axial- und Tangentialgeschwindigkeit während der Bearbeitung konstant. Lediglich an den Umkehrpunkten nehmen die Geschwindigkeiten ab bzw. wechseln ihre Vorzeichen. Durch die konstanten Geschwindigkeiten und die Vorzeichenumkehr der Axialgeschwindigkeit entsteht bei der Honbearbeitung eine charakteristische, sich kreuzende Struktur, siehe Bild 2.2.

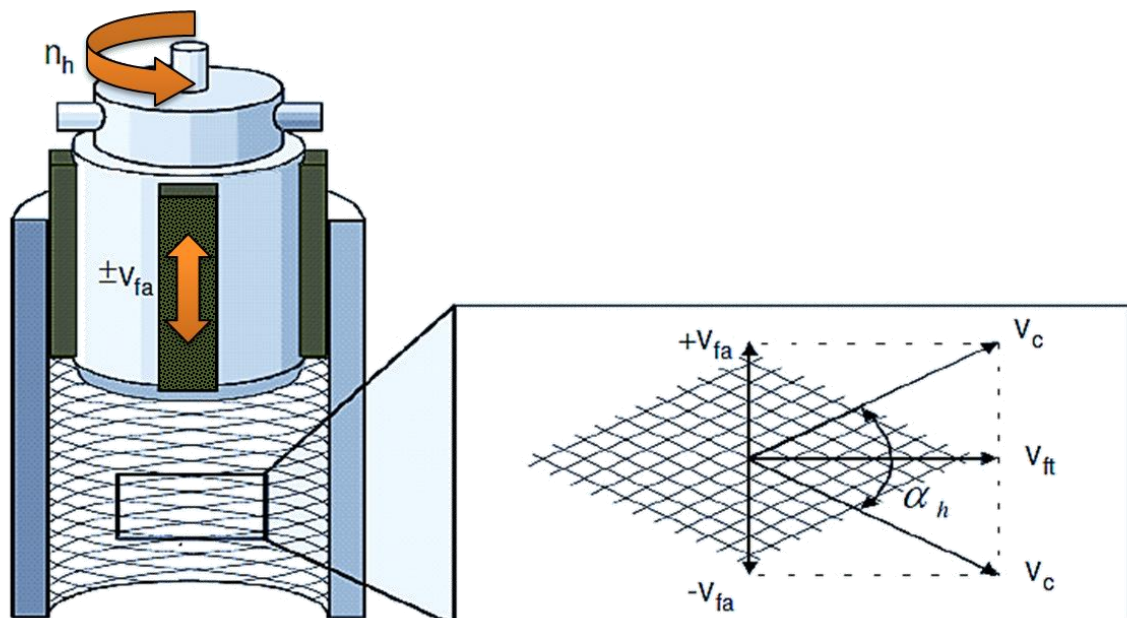


Bild 2.2: Kinematik beim Langhubhonen mit Kreuzstruktur [Schö02]

Durch das Anpressen der Honleiste an die Zylinderbohrung und die ausführende Schnittbewegung entstehen Zerspankräfte. Die in der dargestellten Ebene (Bild 2.3)

liegende Schnittkraft  $F_c$  wird maßgeblich von der Anpresskraft ( $F_{cn}$ ) dem Werkstoff, dem Schmiermittel und der Schärfe der Schneidkörner beeinflusst. Diese Schnittkraft kann aufgeteilt werden in einen tangentialen Kraftanteil  $F_{ct}$  und einen axialen Kraftanteil  $F_{ca}$  (Formel 2.3) [Pauc08]. Die Normalkraft  $F_{cn}$  beeinflusst insbesondere bei Spritzschichten die Formabweichungen der Zylinderbohrung und sollte daher im Prozess so gering wie möglich gehalten werden.

$$F_c = \sqrt{F_{ca}^2 + F_{ct}^2} \quad (2.3)$$

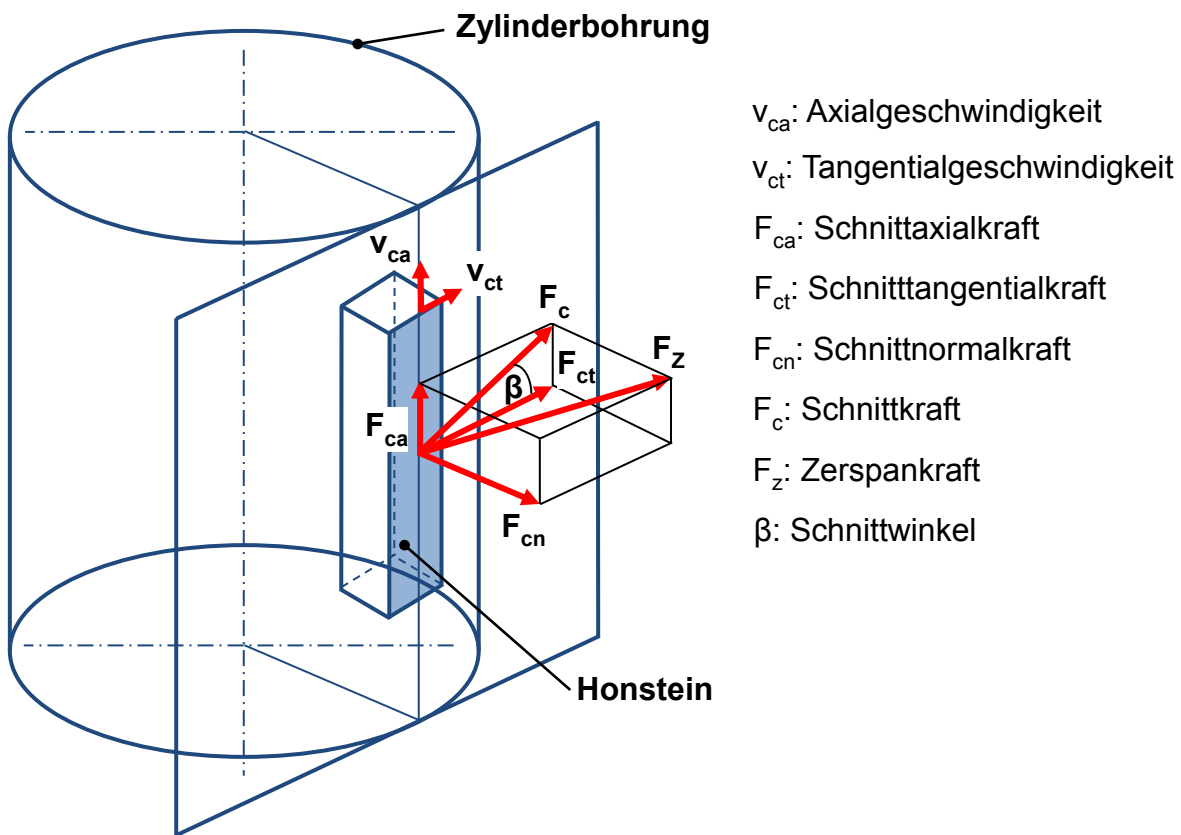


Bild 2.3: Kraftkomponenten beim Langhubhonen [Pauc08]

Das Kraftverhältnis  $F_{ca} / F_{ct}$  ist nicht gleich dem Geschwindigkeitsquotienten  $v_{ca} / v_{ct}$ . Zurückzuführen ist das auf die typische Honstruktur mit Riefen, die vom Korn wieder gekreuzt werden müssen und somit eine erhöhte Reibung axial aufweisen. Dies führt auch dazu, dass der Richtungswinkel  $\beta$  nicht dem Schnittwinkel  $\alpha/2$  entspricht [Pauc08].

### 2.1.2 Einflussgrößen und Kenngrößen des Honprozesses

Die Prozesskenngrößen sowie das Arbeitsergebnis beim Honen werden von der Gesamtheit aller Eingangsgrößen bestimmt. Die Eingangsgrößen des Honprozesses können in System- und Stellgrößen unterteilt werden. Während die Systemgrößen festliegende Eingangsgrößen sind, können die Stellgrößen variiert werden, siehe Bild 2.4.

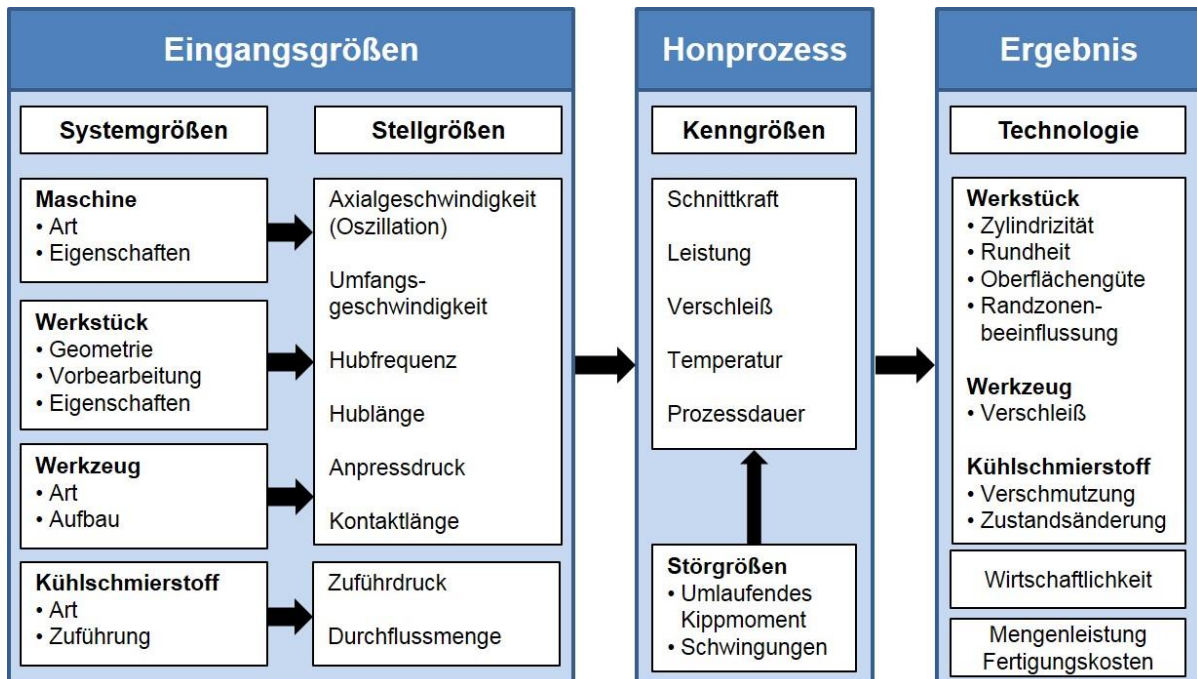


Bild 2.4: Eingangs-, Prozess- und Ausgangsgrößen des Honprozesses [Kloc05]

Ein optimales Ergebnis wird bei der Honbearbeitung nur dann erreicht, wenn die System- und Stellgrößen bestmöglich aufeinander abgestimmt sind. Die Abstimmung der Eingangsgrößen erfordert sehr gute Kenntnisse über die Wechselwirkungen der einzelnen Einflussfaktoren. Ebenso ist ein hoher Grad an Erfahrungswissen im Bereich der Honbearbeitung notwendig. Die Wirkung der Stell- und Störgrößen auf die Ausgangsgrößen wurde bereits in zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten und Beiträgen thematisiert. In Tabelle 2.1 sind die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

Tabelle 2.1: Übersicht der wichtigsten Beiträge zur Analyse der Wirkung der Stellgrößen bei der Honbearbeitung

Stellgröße	Auswirkung	Literatur-Quelle
Qualität Vorbearbeitung ↑ Versatz Spindel/Werkstück ↓ Honsteinlänge + optimaler Hub	Zylinderformfehler ↓	Töns70
Einbringung von Frequenzen	Abtragsleistung ↑	Zett74
Kraft ↑ Zustellgeschw. ↑	Abtragsleistung ↑ Zylinderformfehler ↑ Rauigkeit ↑	Haas55 Kess53 Plas95
Kraft ↑	Rauigkeit ↑	Bier14
Bearbeitungszeit ↑	Rauigkeit ↓	
Umfangsgeschwindigkeit ↑	Rauigkeit ↑	
Schnittgeschwindigkeit ↑	Kraft ↓	Berg90
Zustellgeschwindigkeit ↑	Kraft ↑	

Legende: ↓ niedrig ↑ hoch

Tönshoff untersuchte vor allem die Einflüsse auf die Zylindrizität von Bohrungen. Er stellte fest, dass der Zylindrizitätsfehler von Formfehlern der Vorbearbeitung sowie von Fluchtungsfehlern zwischen Spindel- und Werkstückachse abhängt. Ferner erkannte er, dass ein von der Honsteinlänge abhängiger optimaler Hub existiert, bei dem der Zylindrizitätsfehler reduziert wird [Töns70]. Zettel konnte nachweisen, dass durch die Einbringung von fremd- und eigenerregten Schwingungen die Abtragsleistung wesentlich gesteigert werden kann [Zett74].

[Haas55, Kess53, Plas95] stellten bei der Bearbeitung von Gusseisen mit SiC fest, dass durch hohe Kräfte und Zustellgeschwindigkeiten die Abtragsleistung steigt, Zylinderform und Oberflächenrauigkeit dagegen negativ beeinflusst werden. Höhere Rauigkeit durch hohe Bearbeitungskräfte war ebenfalls das Resultat von Biermann et al. Eine Reduzierung der Rauigkeit konnte bei diesen Untersuchungen durch eine Erhöhung der Bearbeitungszeit erreicht werden. Höhere Umfangsgeschwindigkeiten hatten wiederum eine rauere Oberfläche zur Folge. Für den unbehandelten Stahl wurde bei diesen Untersuchungen CBN in keramischer Bindung eingesetzt [Bier14].

Bergen konnte für Grauguss und gehärteten Stahl nachweisen, dass höhere Schnittgeschwindigkeiten die Bearbeitungskräfte reduzieren, höhere Zustellgeschwindigkeiten dagegen zu einem Kraftanstieg führen. Weiterhin stellte er fest, dass die Bearbeitungskräfte unabhängig vom Honwinkel sind [Berg90].

### 2.1.3 Spanbildung und Verschleißmechanismen

Die Spanbildung erfolgt beim Langhubhonen indem die Honleisten in den Werkstoff durch den Zustellmechanismus eingedrückt werden und gleichzeitig eine rotatorische sowie oszillatorische Schnittbewegung des Werkzeugs erfolgt. Durch die lokal auftretenden elastischen und plastischen Verformungen infolge der unterschiedlichen Schneidkorngeometrien kommt es zu einem pflügartigen Materialabtrag bei duktilen Werkstoffen. Je nach Eindringtiefe des einzelnen Kornes ergeben sich Bereiche der elastischen Verformung, die dann in plastisches Fließen und in Werkstoffabtrennung übergehen, siehe Bild 2.5 links. Die Werkstoffabtrennung bei sprödharten Werkstoffen beruht auf der Ausbildung von Mikrorissen, die sich vernetzen und als einzelne Partikel gelöst werden, siehe Bild 2.5 rechts [Arde00]. Dabei gelangen die Späne in die Poren und werden aus den Zwischenräumen mit Kühlschmierstoff (KSS) abtransportiert.

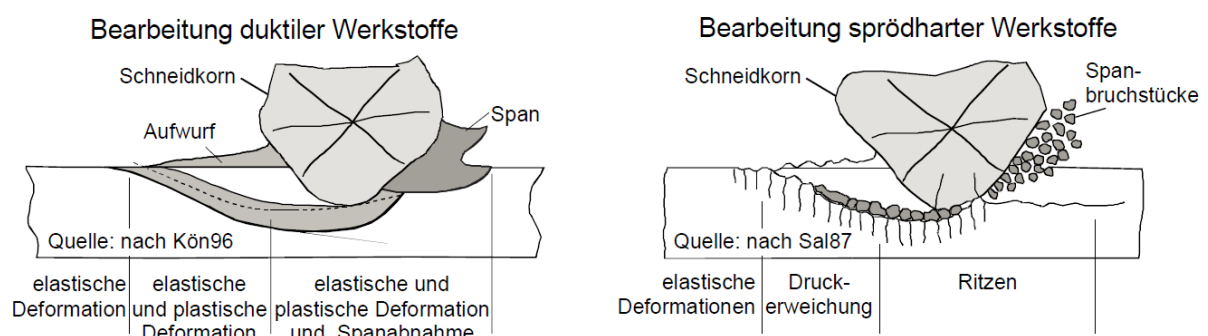


Bild 2.5: Spanbildung beim Honen [Arde00]

Im Gegensatz zur spanenden Bearbeitung mit geometrisch bestimmten Schneiden sind die einzelnen Winkel an der Schneide der Honleiste während des Zerspanprozesses nicht konstant, sondern hängen von der Geometrie und Lage des einzelnen Kornes ab. Die Span-, Keil- und Freiwinkel sind von Korn zu Korn unterschiedlich und ändern sich ständig mit dem Verschleiß des Schneidkornes. Das ist der Grund für das Schwanken der Zerspankräfte während der Bearbeitung. Infolge des Verschleißes sowie der wechselnden Zerspankräfte bzw. Reibungskräfte treten parallel, jedoch an

unterschiedlichen Schneidkörnern der Honleiste, verschiedene Verschleißmechanismen auf. Diese Verschleißmechanismen sind in Bild 2.6 dargestellt.

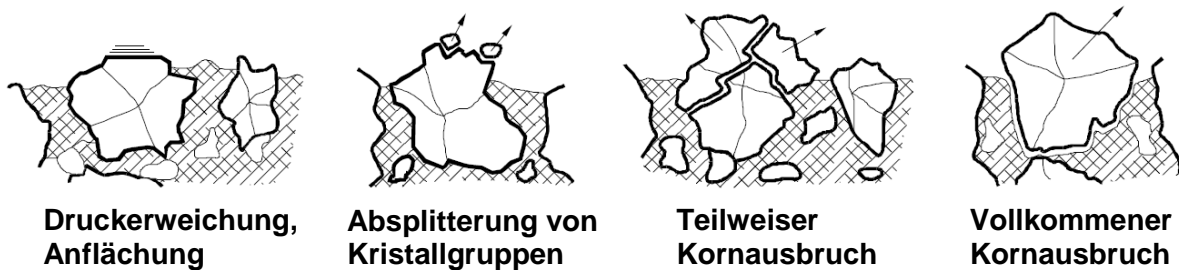


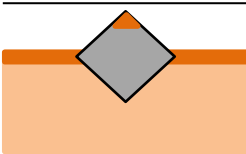
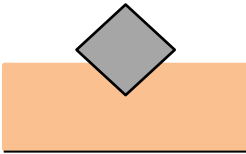
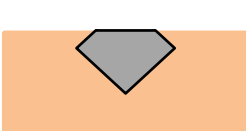
Bild 2.6: Verschleißmechanismen am Schneidkorn [Arde00]

Die Anflächung des Schneidkornes führt bei der Bearbeitung des Werkstücks eher zu einem Umformvorgang als einem mechanischen Abtrennvorgang, weil das Material durch den flächigen Eingriff des Schneidkornes verdrängt wird. Das führt dazu, dass das Material nicht mehr sauber abgetrennt wird und sich Aufwürfe an der bearbeiteten Oberfläche ausbilden, vgl. Bild 2.5 links. Dadurch werden die Oberflächeneigenschaften einer Zylinderwand wesentlich beeinflusst. Infolge der stumpf werdenden Schneidkörner kommt es zum Kraftanstieg an der Honleiste. Die steigende Kraft führt zur Absplitterung des Schneidkornes. Steigt die Kraft weiter an, so kann es zum Kornausbruch kommen. Es wird zwischen teilweisem und vollkommenem Kornausbruch unterschieden. Der Unterschied zwischen den beiden Ausbruchsarten ist in Bild 2.6 dargestellt. Durch diese Wechselwirkung kommen immer neue scharfe Schneidkörner in den Eingriff. Dieser Selbstschärfeffekt der Honleisten ist wegen des ständigen Flächenkontaktes zum Erhalt der Schnitffähigkeit unbedingt notwendig. Das Ausbleiben dieses Effekts führt zur Erhöhung des Oberflächendrucks und einer erhöhten Oberflächenquetschung des Werkstückstoffes. Ist das Selbstschärfverhalten zu stark ausgeprägt, führt dies zu kürzeren Standmengen der Honleisten. Deshalb ist das Bindungssystem der Honleiste so auszulegen, dass beim Abstumpfen des Schneidkornes die Bindung dieses frei gibt und neue, scharfe Schneiden zum Einsatz kommen.

Der Verschleiß tritt nicht nur am Schneidkorn sondern auch in der Bindung auf. Die Bindung einer Honleiste hat die Aufgabe, die einzelnen Schneidkörner zusammenzuhalten. Bei der Spanbildung gleitet der Span entlang des Schneidkeiles in die Spankammer und wird teilweise durch die Bindungsbrücken, zwischen den einzelnen Schneidkörnern, in seiner Bewegung gestoppt. Dadurch entstehen hohe Kontaktkräfte und im Zusammenhang mit der Bewegung der Verschleiß. In vielen Fällen ist aber der

Kornverschleiß die indirekte Ursache des Bindungsverschleißes. Durch die Abflachung an der Kornschneide vergrößert sich die Reibfläche. Das hat einen Anstieg der Schnittkräfte und damit eine mechanische Überlastung der Bindung zur Folge. Die Wechselwirkung zwischen dem Schneidkorn- und Bindungsverschleiß hat einen enormen Einfluss auf die Ausprägung des Selbstschärfeffekts. In der nachfolgenden Tabelle 2.2 sind die Ursachen und Wirkungen im Zusammenspiel beider Verschleißverhalten dargestellt.

Tabelle 2.2: Verschleißverhalten von Bindung und Korn [Flor10b]

Verschleißverhalten	Wirkung	Ursache
 Bindungsverschleiß = Kornverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Selbstschärfung</li> <li>- Gutes Schneiden</li> </ul>	Abstimmung von Bindungshärte und Konzentration
 Bindungsverschleiß > Kornverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gutes Schneiden</li> <li>- Niedrige Standmenge</li> <li>- Vorzeitiger Kornausbruch</li> </ul>	Bindung zu weich oder Konzentration zu hoch
 Bindungsverschleiß < Kornverschleiß	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schlechtes Schneiden</li> <li>- Honstein abgestumpft</li> <li>- Keine erhabenen Körner</li> </ul>	Bindung zu hart oder Konzentration zu niedrig

Wie aus Tabelle 2.2 zu erkennen ist, sind die beiden Verschleißmechanismen aufeinander bestmöglich anzupassen (Bindungsverschleiß = Kornverschleiß). Das ist anzustreben, um ein gleichmäßiges Verschleißverhalten der Bestandteile einer Honleiste sowie ein optimales Selbstschärfverhalten zu gewährleisten.

Daneben sind die Verschleißerscheinungen von dem zu bearbeitenden Werkstückstoff abhängig. Die Bindungshärte bei der Bearbeitung von harten, im Vergleich zu weichen Werkstückstoffen, muss eine geringere Härte aufweisen. Dadurch können schnell scharfe Schneidkörner in Eingriff gebracht werden. Zusätzlich sind die Porengröße sowie das Porenvolumen so auszulegen, dass die abgetragenen Späne die Sparräume nicht verstopfen und durch KSS ausgespült werden können. Das daraus resultierende Verschleißverhalten ist mit dem Verhalten aus der Tabelle 1 (Bindungsverschleiß < Kornverschleiß) zu vergleichen [Arde00, Flor92, Flor10b, Wiec55].



### 2.1.4 Schneidstoffe und Bindungssysteme

Die Eigenschaften der Honleisten sowie das Ergebnis der bearbeiteten Oberfläche werden hauptsächlich durch die Kornart, Korngröße, Bindungsart und Tränkung beeinflusst. Wie beim Schleifen, wird auch beim Honen zwischen herkömmlichen und superharten Kornwerkstoffen unterschieden. Zu der Gruppe der superharten Schneidstoffe gehören Diamant und kubisches Bornitrid, die zum großen Teil mit metallischer Bindung versehen sind. In die Kategorie der herkömmlichen Schneidstoffe werden Korund, Edelkorund, Siliziumkarbid (SiC) und Sinterkeramik, mit überwiegend keramischer Bindung, eingegliedert. Die Härte der Schneidkörner wird in der Knoop-Härte angegeben. Das Prinzip basiert auf der Messung der Eindruckdiagonalen, die mittels einer Diamantpyramide mit rhombischer Grundfläche sowie unter vorgegebener Last und Einwirkzeit erzeugt werden. Die Härtewerte der einzelnen Schneidkörper sind in Tabelle 2.3 dargestellt.

Tabelle 2.3: Knoop-Härte der 4 gängigen Schneidstoffe [Kloc05]

Schneidstoff	Knoop-Härte [kg/mm <sup>2</sup> ]
Korund	≈ 2000
Siliziumkarbid	2400 – 3000
Kubisches Bornitrid	≈ 4700
Diamant	7000 – 8000

Diamantschneidstoffe werden bevorzugt für die Vorhonoroperationen eingesetzt. Durch die hohe Härte des Schneidstoffes sind hohe Standmengen sowie hohe Zeitspanvolumina realisierbar. Ein Diffusionsverschleiß des Diamantkorns tritt bei der Honbearbeitung von Stahl nicht auf. Die niedrigen Schnittgeschwindigkeiten beim Honen führen nicht zu den hohen Temperaturen, die erforderlich sind, um die Kohlenstoffdiffusion auszulösen.

Beim Fertig- und Feinhonen wird als Schneidstoff entweder Diamant in metallischer Bindung oder Siliziumkarbid mit keramischer Bindung eingesetzt. Durch das bessere Splitterverhalten der keramischen Bindung gegenüber anderen Bindungswerkstoffen können immer neue und scharfe Schneidkörner hervortreten. Diese Eigenschaft führt



zur Verbesserung der Oberflächengüte und Neuschärfung. Im Gegensatz zur metallisch gebundenen Diamanthonleiste erfolgt die Spanabnahme bei keramisch gebundenen Schneidstoffen nicht ausschließlich durch die einzelnen Schneidkörner. Die sogenannten Bindungsbrücken sind ebenfalls an der Spanabnahme beteiligt. Die Bindung hat die Aufgabe die einzelnen Schneidkörner zusammenzuhalten, bis diese abstumpfen. Anschließend werden die stumpfen Schneidkörner freigegeben. Die Art und die Zusammensetzung der Bindung beeinflusst im Wesentlichen den Verschleiß sowie das Selbstschärfungsverhalten. Der Unterschied bezüglich der topografischen Merkmale zwischen den beiden Arten wird anhand Bild 2.7 verdeutlicht.

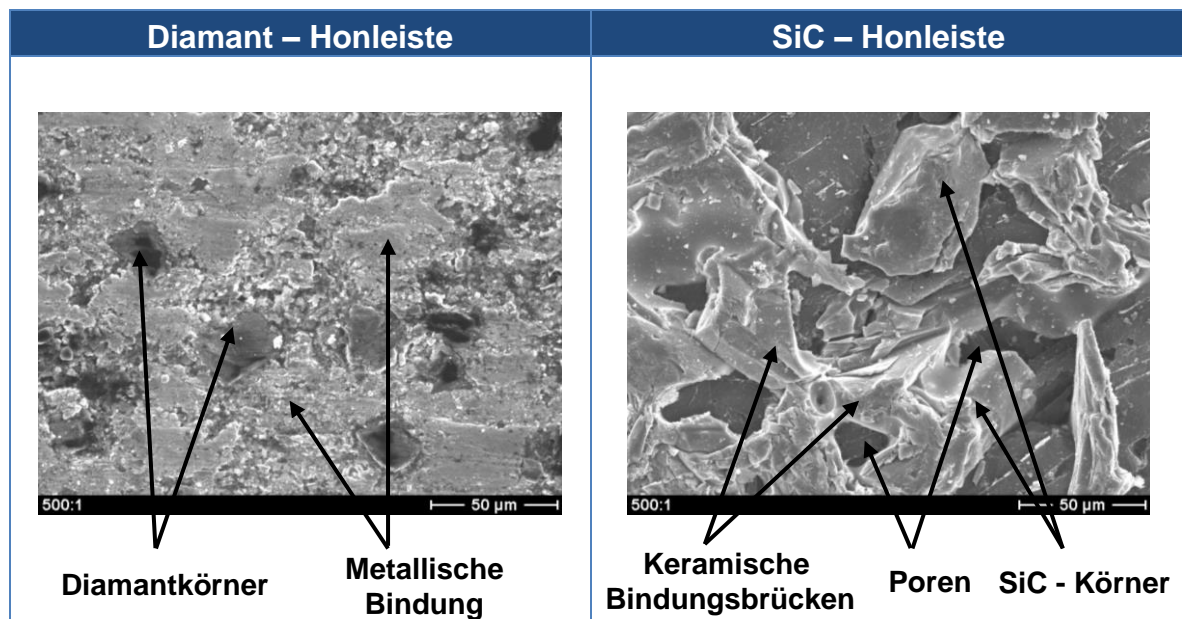


Bild 2.7: REM - Aufnahmen von Diamant- und SiC-Honleiste

In Bild 2.7 ist links die Oberfläche einer Diamant-Honleiste abgebildet. Durch die hohe Dichte der metallischen Bindung ist kein Porenvolumen zu erkennen. Im Gegensatz zu metallisch gebundenen Diamant-Honleisten weisen die SiC-Honleisten einen hohen Anteil an Porenvolumen auf. Ebenso sind die Bindungsbrücken zwischen den einzelnen SiC-Körnern, im Gegensatz zur Diamant-Honleiste, deutlich zu erkennen, vgl. Bild 2.7 rechts.

Metallische Bindungen bestehen bei den superharten Schneidstoffen im Wesentlichen aus Sintermetallen, wie Bronze mit Bestandteilen aus Nickel, Kupfer, Kobalt und Eisen. Die keramischen Bindungen werden hauptsächlich aus Kaolin, Feldspat, Quarz und Borsilikaten aufgebaut. Durch die unterschiedlichen Dosierungen der einzelnen Komponenten können definierte, schleiftechnische Eigenschaften der Schneidstoffe

erzielt und so den gegebenen Zerspanungsverhältnissen angepasst werden. Im nachfolgenden Dreistoffdiagramm für die beiden Schneidstoffe lassen sich diese hinsichtlich ihrer Zusammensetzung charakterisieren, siehe Bild 2.8.

Aus diesem Dreistoffdiagramm sind die größten Unterschiede zwischen superharten und keramischen Honleisten deutlich zu erkennen. Bei Diamant- und CBN-Honleisten besteht das Gefüge hauptsächlich aus dem Bindungsmaterial und weist nur ein geringes Porenvolumen auf.

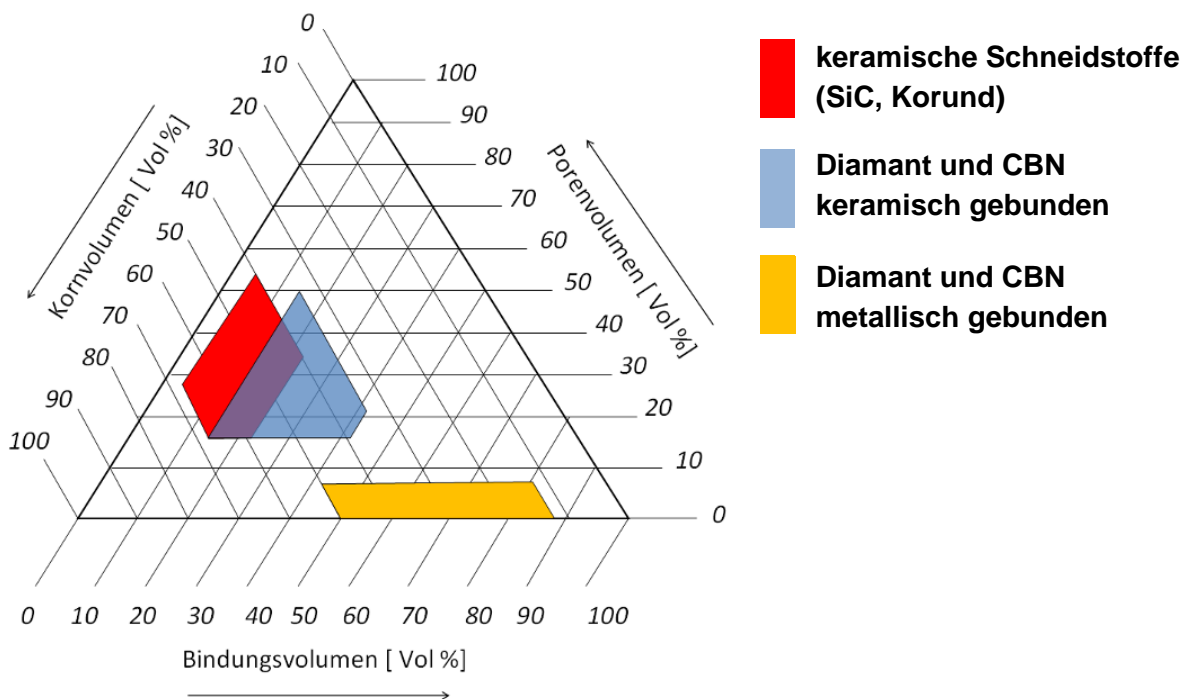


Bild 2.8: Dreistoffdiagramm für keramische Honleisten, Diamant- und CBN-Honleisten [Flor10b]

Im Vergleich zu metallisch gebundenen Honleisten kann bei keramischen Honleisten das Gefüge der Bindung zum großen Teil aus Poren bestehen. Die einzelnen Poren dienen als Spankammern und müssen deshalb groß genug sein, um die von dem Schneidkorn abgetragene Spanmenge aufzunehmen. Sind die Poren zu klein, werden die Spankammern verstopft. Das erschwert den Abtransport der Späne durch das KSS. Dies kann zur Verschlechterung der Oberflächenqualität und dem Anstieg der Zerspankräfte führen. Ferner kann die Honleiste zuschmieren, wodurch das Zeitspanvolumen sinkt [Flor10b].

Durch die Variationen der verschiedenen Volumenanteile können verschiedene Honleistspezifikationen mit unterschiedlichen Eigenschaften für verschiedene Anforderungen der Bearbeitung generiert werden. Die Härte wird über die Spezifikation des Bindungswerkstoffes und die Höhe des Porenanteils festgelegt. Das Gefüge beschreibt dabei die Porosität der Honsteine. Ein offenes Gefüge spricht für eine weiche Honleiste. Es können jedoch auch harte Honsteine mit einem offenen Gefüge hergestellt werden, indem die Stärke der Bindungsbrücken variiert wird.

Um die Eigenschaften der keramischen Honleisten zu verbessern, werden diese häufig mit Wachs oder Schwefel getränkt [Yama78a, Yama78b, Yama79]. Dabei werden die Poren des Honsteins ausgefüllt, so dass ein Gleitfilm zwischen Honstein und Werkstück entsteht. Dadurch ergeben sich höhere Oberflächengüten, geringerer Honleistenverschleiß und eine bessere Spanabfuhr. Außerdem führt das Tränken zur Steigerung der Festigkeit, da die einzelnen Bindungsbrücken zwischen den Schneidkörnern zusätzlich „abgestützt“ werden.

Die wichtigsten Eigenschaften der Honsteine wie Körnung, Härtegrad, Gefüge, Art des Schneidstoffes, Art der Bindung und eventuelle Nachbehandlung (Tränkung) werden nach DIN 603-10 angegeben, siehe Bild 2.9. Die Angaben der einzelnen Hersteller können jedoch von der DIN 603-10 abweichen, da diese ihre internen Bezeichnungen verwenden. Deshalb ist bei der Bezeichnung der Honleisten die jeweilige Werksnorm zu beachten.

### Honstein DIN ISO 603-10 - A10 x 160 A150 L8 V (S)

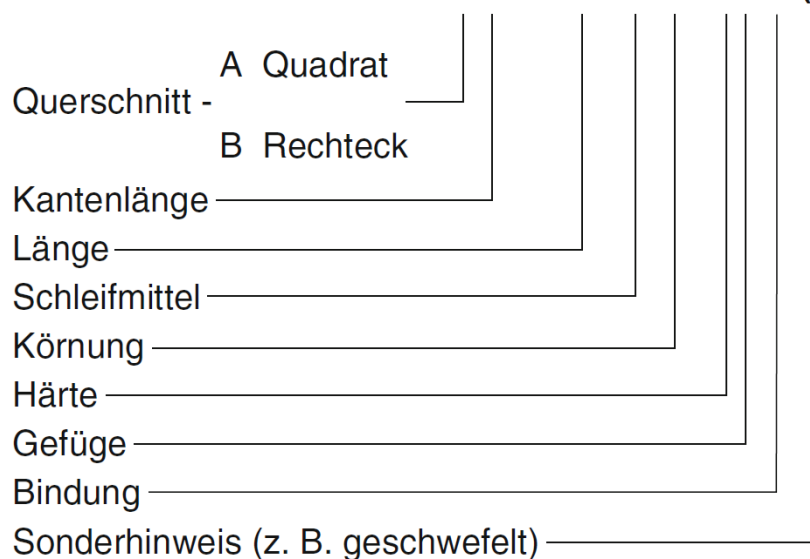


Bild 2.9: Beispielhafte Honleistenbezeichnung (Korund als Kornwerkstoff) [Frit08]

Da keine einheitliche Definition für Honleistenbezeichnungen existiert, können die Honleisten derselben Spezifikation zweier Hersteller völlig unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Deshalb ist eine praktische Überprüfung der Honleisten zur Bewertung der einzelnen Spezifikationen unabdingbar [DIN05a, Hube08, Opti64, Pauc08].

## 2.2 Honwerkzeuge und Zustellsysteme

Beim Langhubhonen ist die Korrektur der Bohrungsposition sowie deren Winkellage nicht möglich. Die Positionierung der Bohrungen wird durch das Feindreihen vorgegeben. Da das Kurbelgehäuse fest auf dem Bearbeitungstisch gespannt ist, sind für die Kinematik des Werkzeugs Freiheitsgrade notwendig. In Bild 2.10 sind die theoretisch notwendigen Freiheitsgrade für die Werkzeugaufnahme schematisch dargestellt. Die vier Freiheitsgrade des Werkzeugs ergeben sich durch die doppelgelenkige Werkzeugaufnahme, die so genannte Pendelstange.

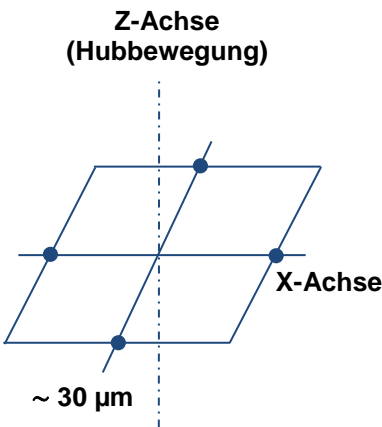
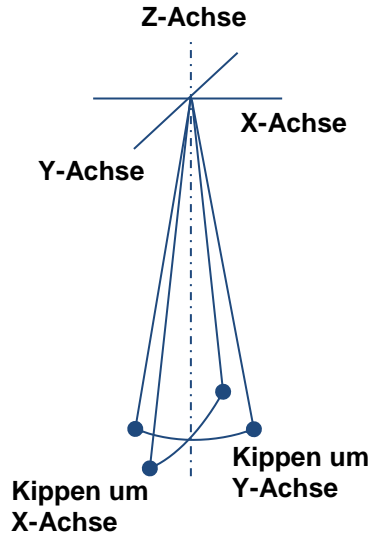
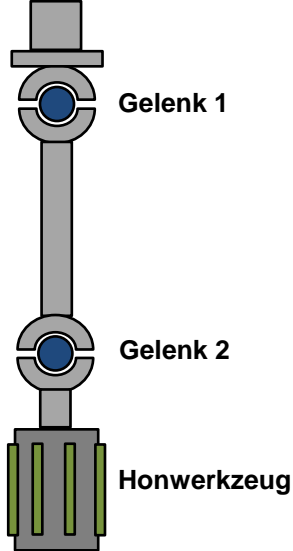
Zentrierung entlang der X- und Y-Achse, Freiheitsgrad 1 und 2	Kippung um die X- und Y-Achse, Freiheitsgrad 3 und 4	Prinzipskizze einer doppelgelenkigen Werkzeugaufnahme (Pendelstange)
 <p>Z-Achse (Hubbewegung)</p> <p>X-Achse</p> <p>~ 30 µm</p>	 <p>Z-Achse</p> <p>X-Achse</p> <p>Y-Achse</p> <p>Kippen um X-Achse</p> <p>Kippen um Y-Achse</p>	 <p>Gelenk 1</p> <p>Gelenk 2</p> <p>Honwerkzeug</p>

Bild 2.10: Freiheitsgrade des Honwerkzeugs [Flor10a]

Die Zentrierung des Werkzeugs zur Bohrungsachse wird durch die radiale Aufweitung des Werkzeugs innerhalb der Bohrung erreicht. Damit die beiden Achsen parallel zueinander liegen, sind neben zwei Freiheitsgraden der Zentrierung weitere zwei

Freiheitsgrade zur Kippung des Honwerkzeugs notwendig. In Bild 2.11 ist der Aufbau eines einfachaufweitenden Honwerkzeugs dargestellt.

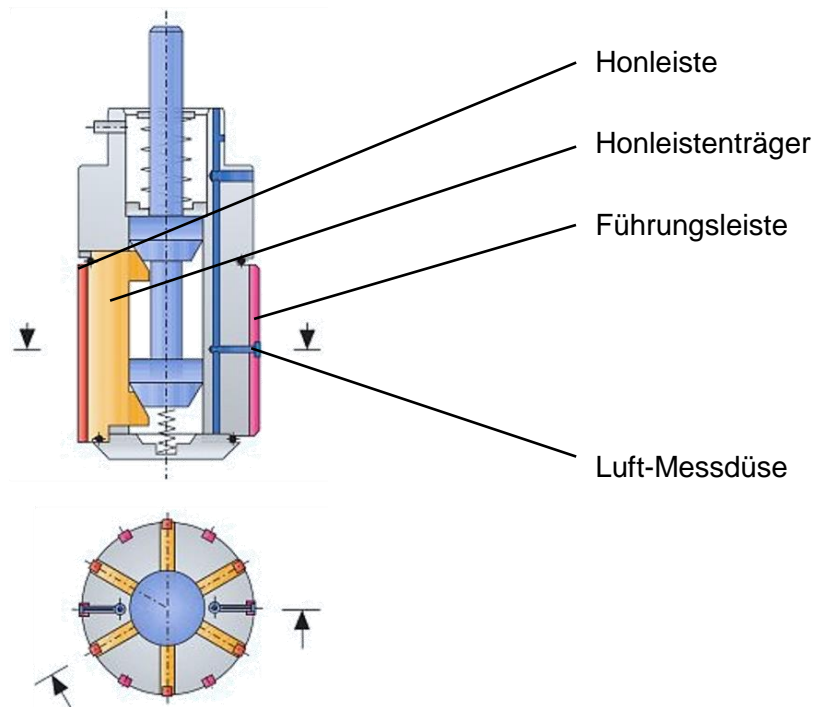


Bild 2.11: Grundlegender Aufbau eines Honwerkzeugs [Flor92]

Durch die axiale Bewegung der Druckstange nach unten erfolgt über den Doppelkegel eine radiale Aufweitung der Honleistenträger. Nach der Bearbeitung geht die Druckstange zurück und die Honleistenträger werden mit Hilfe von Rückholfedern in ihre Ausgangsposition geführt. Das abgebildete Werkzeug ist mit einer Inprozessmesseinrichtung ausgestattet. Es beruht auf dem Prinzip der Pralldruckmessung (Luft) zwischen Werkzeug- und Werkstückoberfläche. Dieses Inprozessmesssystem ermöglicht die Messung des Zylinderdurchmessers während der Bearbeitung. Bei Doppelaufweitwerkzeugen ist ein weiterer Doppelkegel vorhanden, so dass die jeweiligen Honleistenträger unabhängig voneinander zugestellt werden können. Dadurch können zwei Honoperationen mit einem Werkzeug durchgeführt werden.

Die Zustellung der Honleisten erfolgt entweder **elektromechanisch** oder **hydraulisch**. Letzteres wird auch als kraftschlüssiges Zustellsystem bezeichnet, da hydraulisch geregelter Öldruck in einem Kolbenmechanismus die axiale Bewegung des Zustellkegels verstellbar macht und so einen permanent wirkenden Anpressdruck an der Honleiste aufbaut. Dagegen erfolgt bei der formschlüssigen, elektromechanischen Zustellung (EMZ) eine konstante, weggebundene Konusaufweitung. Dabei arbeitet das

Zustellsystem über einen Servomotor mit Zustellgetriebe. Vorteilhaft ist hierbei die genaue, schrittförmige Einstellbarkeit des Zustellweges, wobei impulsartig wirkende Zustellschritte die Schneidfähigkeit der Honleisten positiv beeinflussen können. In Tabelle 2.4 sind zusammenfassend die Eigenschaften der beiden Zustellsysteme gegenübergestellt [Flor92, Kloc05, Pauc08].

Tabelle 2.4: Eigenschaften der Zustellsysteme HAZ und EMZ

Hydraulische Zustellung (HAZ)	Elektrisch-Mechanische Zustellung (EMZ)
Funktionsweise	Funktionsweise
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Hydraulisch erzeugte Zustellkraft</li> <li>- Konstanter Anpressdruck</li> <li>- Druckregelung stufenlos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zustellkraft erzeugt durch Servomotor und Getriebe</li> <li>- Zustellung über Zustellschritte und Zeitintervall</li> </ul>
Funktionsdiagramm	Funktionsdiagramm

## 2.3 Zylinderlaufbahntechnologien

Die Zylinderlaufbahn unterliegt aufgrund der Hubbewegung von Kolben bzw. Kolbenring einer Verschleißbeanspruchung. Der Richtungswechsel der bewegten Teile führt am oberen Umkehrpunkt der Kolbenringe zu einer eingeschränkten Schmierung, wodurch an dieser Stelle ein besonders hoher Verschleiß auftritt. Ein Großteil des Verschleißes an Zylinderlaufbahn und Kolben hängt von den Werkstoffpaarungen ab, die für beide Bauelemente ausgewählt wurden. Die Herausforderung zur Verringerung des Verschleißes liegt darin, dass die Zylinderlaufbahn einerseits zur Reibungsminimierung fein sein und andererseits zur Sicherstellung der Schmierung eine entsprechende Rauigkeit (Riefen) oder Porosität aufweisen muss. Der Ölverbrauch und das Verschleißverhalten der tribologischen Gleitpartner werden von der Art und Qualität der Zylinderlaufbahn beeinflusst [Mahl09]. Neben Werkstoff und Oberfläche

können auch additive Prozesse die Eigenschaften einer Zylinderlaufbahn beeinflussen. Einen derartigen Ansatz verfolgten Karpuschewski et al. Dabei konnte bei einer fertiggeholten Graugussoberfläche durch einen zusätzlichen Glattwalzprozess eine Reibungsreduzierung und ein verbessertes Einlaufverhalten im SRV-Tribometer konstatiert werden. Bei zu hohen Pressungen des Glattwalzens konnte aufgrund möglicher Randzonenschädigung ein Anstieg der Reibwerte festgestellt werden. Eine chemische Veränderung der Randzonenschicht durch den Glattwalzprozess konnte bei diesen Untersuchungen nicht nachgewiesen werden [Karp12].

Die nachfolgende Abbildung veranschaulicht die tribologischen Zusammenhänge einer Zylinderlaufbahn mit thermischer Spritzschicht, siehe Bild 2.12 [Flor07].

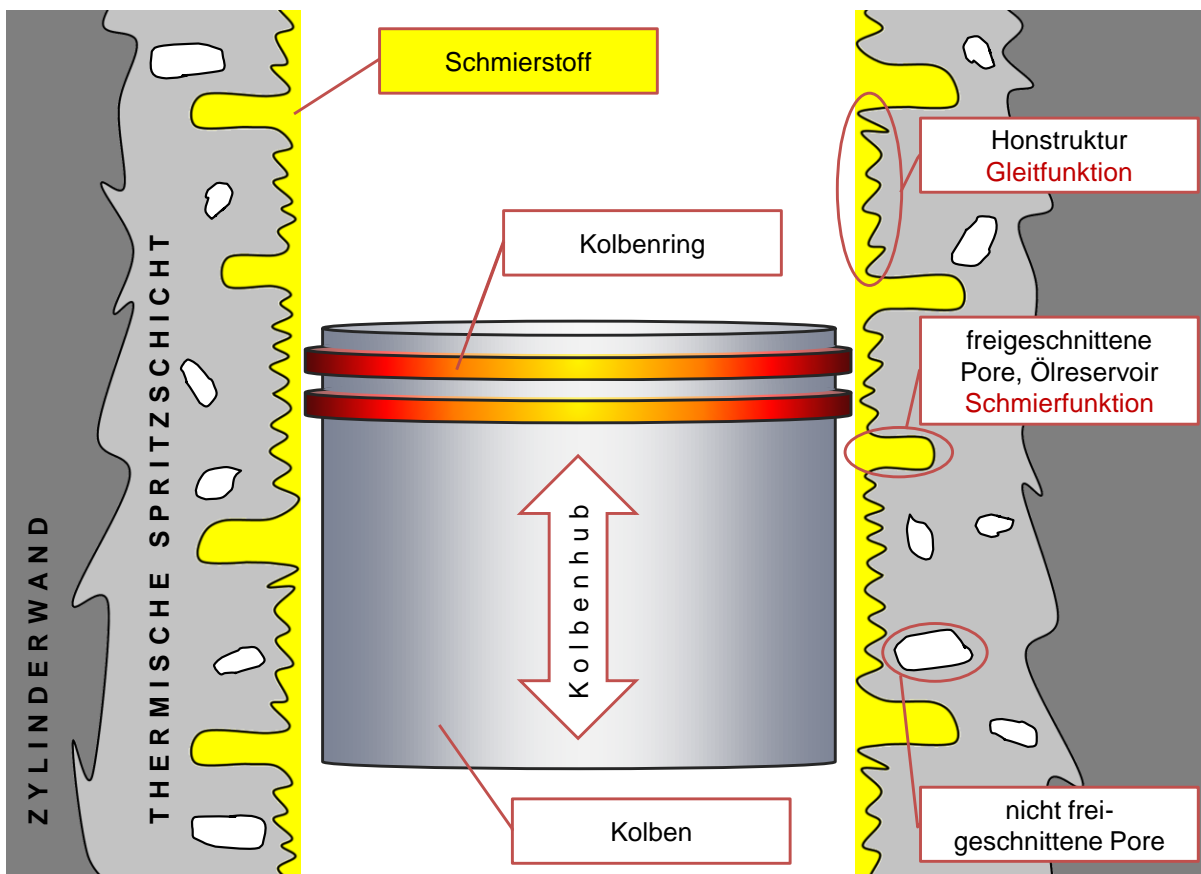


Bild 2.12: Tribologischer Zusammenhang im Kolben-Zylinderlaufbahn-System nach [Flor07]

Heutige Diesel- und Ottomotoren unterliegen den hohen Anforderungen der Wirkungsgradoptimierung, des Downsizings und der Kostenminimierung. Demnach steigen auch die Ansprüche an die Zylinderkurbelgehäuse bzw. Zylinderlaufbahnen. Für die Fertigung von Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen existieren verschiedene Verfahren,



siehe Bild 2.13. Weiterentwickelte Gießprozesse ermöglichen die notwendigen dynamischen Festigkeiten, so dass diese nach heutigem Stand die Anforderungen am besten erfüllen [Bobz08, Gand11].

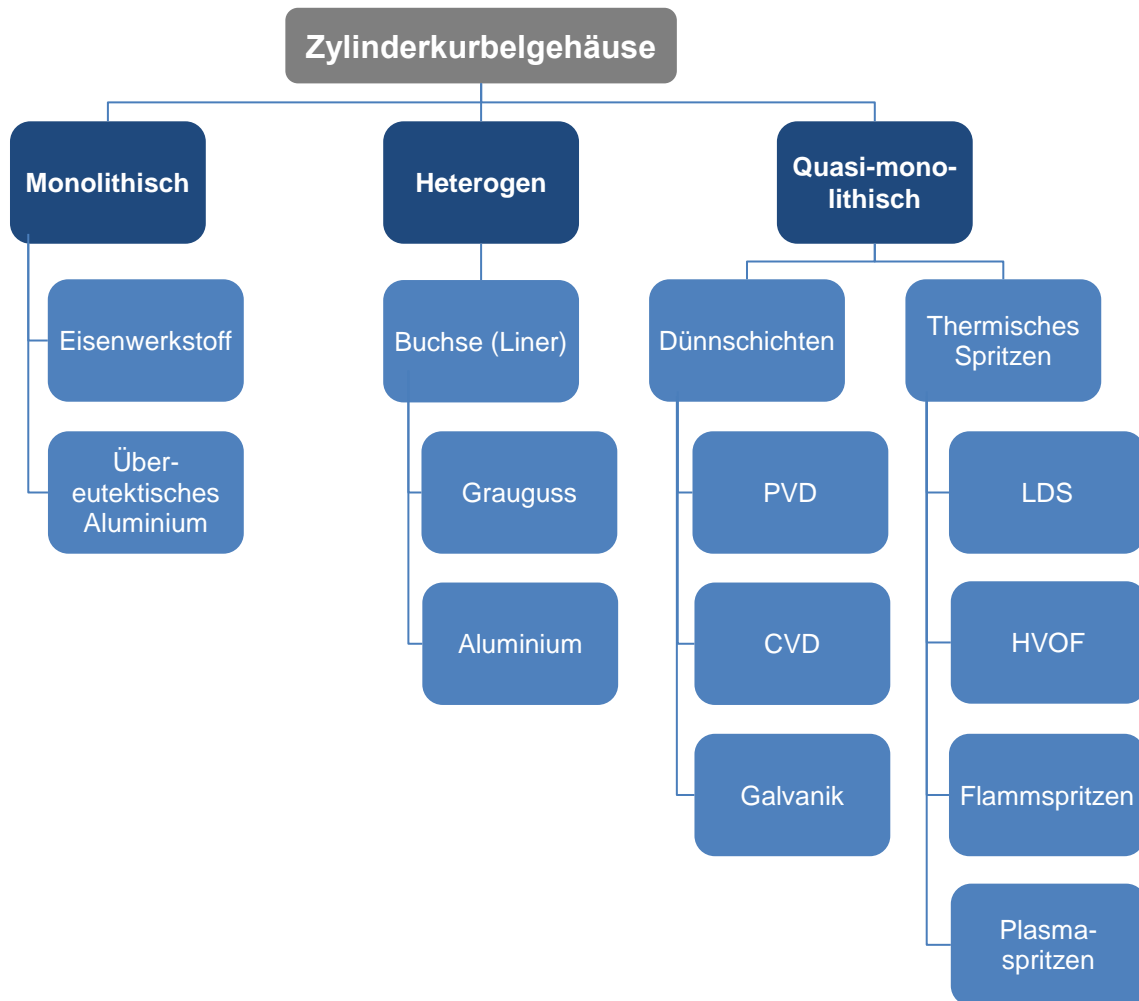


Bild 2.13: Zylinderlaufbahntechnologien für Aluminium-Kurbelgehäuse [Gand11]

Zur Erzeugung des Zylinderlaufbahn-Werkstoffs in Aluminium-Zylinderkurbelgehäusen werden verschiedene Verfahren angewendet: Zum einen kann für monolithische Kurbelgehäuse Silizium freigelegt werden. Eine übereutektische Aluminium-Silizium-Legierung dient hierbei dem monolithischen Zylinderkurbelgehäuse als Grundwerkstoff. Durch chemisches Ätzen oder infolge eines mechanischen Prozesses werden Siliziumkristalle an der Zylinderlaufbahn-Oberfläche freigelegt. Zum anderen können für heterogene Kurbelgehäuse Grauguss-Buchsen (Gusseisen mit Lamellen-grafit, GJL) eingegossen werden. Diese sind bei entsprechender Oberflächentopografie in Bezug auf Herstellkosten, Reibung und Verschleiß vorteilhafter als freigelegtes Silizium. Bei quasi-monolithischen Kurbelgehäusen werden die Zylinderwände



zur Erzeugung der Zylinderlaufbahnen beschichtet. Dies kann über Dünnschichtverfahren oder thermische Spritzverfahren erfolgen. Aufgrund zu hoher Substrattemperaturen und hohen Fertigungskosten eignen sich das PVD- (physical vapour deposition) und CVD-Verfahren (chemical vapour deposition) nicht für die Anwendung bei Zylinderkurbelgehäusen. In den galvanischen Verfahren kommt es zu niedrigeren Substrattemperaturen, jedoch entstehen auch hier zu hohe Fertigungskosten. Zudem bestehen Nachteile in Bezug auf die Umweltverträglichkeit [Gand11, Mahl09]. Zu den gängigsten, thermischen Spritzverfahren gehören folgende:

- Lichtbogendrahtspritzen (LDS)
- High Velocity Oxygen Fuel (HVOF)
- Flamspritzen
- Plasma-Verfahren: z.B. das atmosphärische Plasmaspritzen (APS) mit pulverförmigem Spritzwerkstoff oder das Plasma-Transferred-Wire-Arc-Verfahren (PTWA) bei dem Draht als Spritzwerkstoff zur Anwendung kommt

Das thermische Spritzen findet in verschiedenen Industriebereichen zur Auftragung von Verschleißschutz-Beschichtungen Anwendung. Für den Einsatz innerhalb der Automobiltechnik lassen sich insbesondere Potentiale bezüglich der Reibungs- und Gewichtsreduzierung, der Verringerung im Ölverbrauch sowie der Kraftstoffkompatibilität erschließen. Zugleich ergibt sich eine deutliche Steigerung der Verschleißfestigkeit [Barb01, Köhl09].

## 2.4 NANOSLIDE-Prozesskette

Unter dem Oberbegriff NANOSLIDE werden die charakteristische Oberflächenstruktur der Endoberfläche sowie die zugehörigen Fertigungsprozesse und Messverfahren subsumiert. Die NANOSLIDE-Technologie kam erstmalig 2006 bei dem 8-Zylinder-Ottomotor M156 der Fa. AMG in Kleinserie zum Einsatz. Seither wurde die Prozesskette zur Herstellung der fertigen Zylinderlaufbahn unter funktionalen sowie wirtschaftlichen Gesichtspunkten stetig weiterentwickelt. In Bild 2.14 ist die aktuelle NANOSLIDE-Prozesskette dargestellt. Auf die einzelnen Prozessschritte wird nachfolgend näher eingegangen.

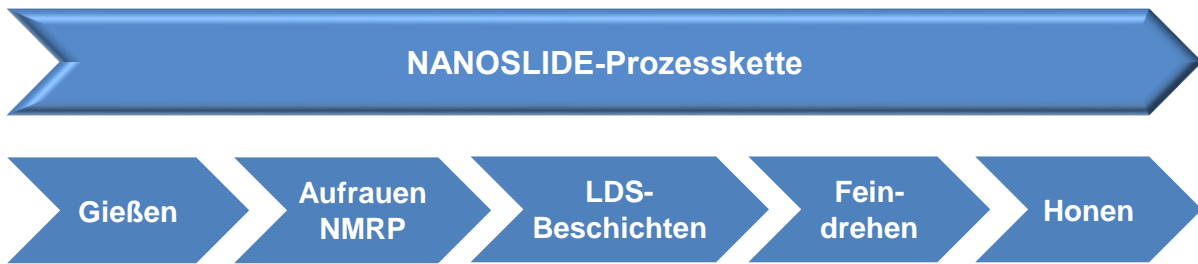


Bild 2.14: Prozessschritte der NANOSLIDE-Technologie

Der erste Schritt in der NANOSLIDE-Prozesskette ist das Gießen des Kurbelgehäuses. Das Gießverfahren und der Werkstoff spielen eine entscheidende Rolle in der Prozesskette, da dadurch der anschließende mechanische Aufrauprozess maßgeblich beeinflusst wird. Beispielsweise können die mechanischen Werkstoffeigenschaften Einfluss auf den Spanbruch und damit die Schichthaftung haben. Weiterhin können Hartstoffpartikel im Guss (Oxide, Sand) zu Schneidenbrüchen und damit zu Arbeitsausschuss führen.

Der mechanische Aufrauprozess NMRP (Nissan Mechanical Roughing Process) zur Aktivierung der Zylinderlauffläche geht auf ein Patent der Fa. Nissan, einem Kooperationspartner der Daimler AG, zurück [Niss09]. Der NMRP-Prozess wird in die Kategorie „Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide“ eingeordnet. Die gewünschte Oberflächentopografie wird bei diesem Verfahren durch ein dreischneidiges Werkzeug realisiert, siehe Bild 2.15.

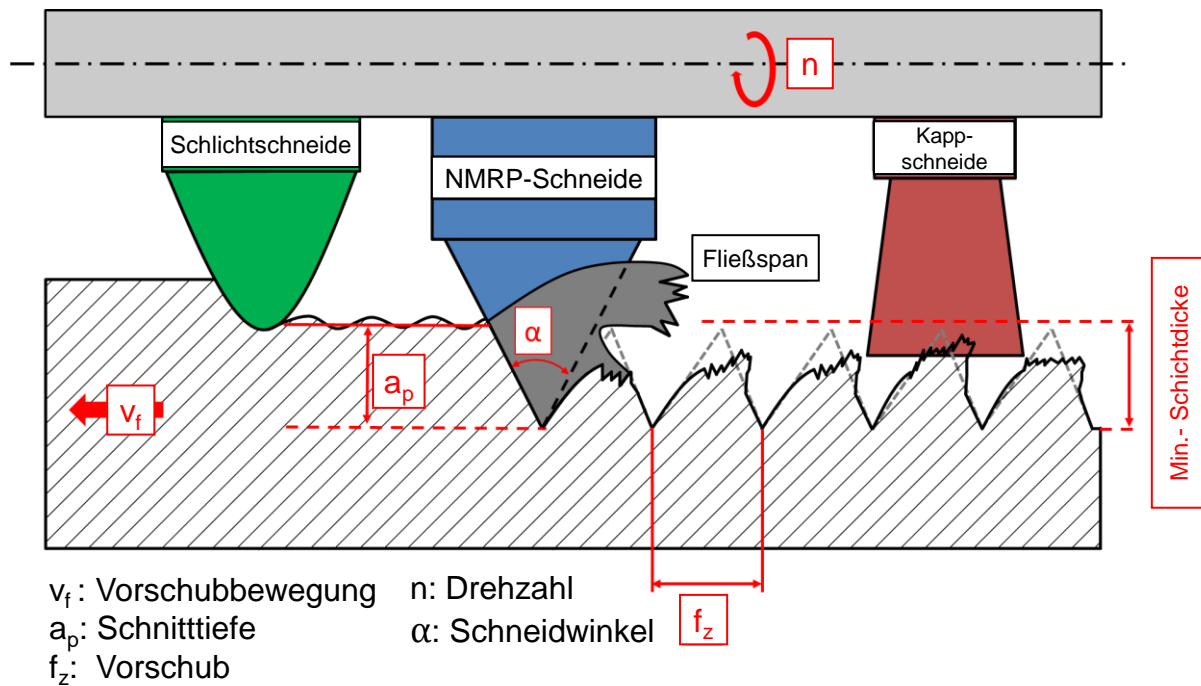


Bild 2.15: Schematische Darstellung des NMRP-Prozesses [Niss09, Wenz15]

Die Schlichtschneide führt den ersten Prozessschritt aus. Dabei bringt die Schneide den Durchmesser der Zylinderbohrung auf ein definiertes Maß. Die Aufragschneide erzeugt eine definierte, V-förmige Oberflächenstruktur. Durch entsprechende Prozessparameter wird der entstehende Fließspan so umgelenkt, dass die dahinter liegenden Rauigkeitsspitzen entweder plastisch verformt oder vollständig abgetrennt werden. Durch die plastische Verformung des Fließspans entstehen bei der Umformung die für die Schichthaftung essentiellen Hinterschneidungen. Im letzten Schritt wird mit der Kappschneide die Einhaltung der Mindestschichtdicke sichergestellt. Dabei werden alle nicht abgerissenen oder umgeformten Stege durch die Kappschneide auf einer definierten Höhe abgeschert. Dadurch wird sichergestellt, dass keine nicht abgebrochenen Stege in die Schicht hineinragen und eine geforderte Mindestschichtdicke eingehalten wird.

Nach der Aktivierung der Zylinderlaufbahn durch den NMRP-Prozess erfolgt der Schichtauftrag durch das Lichtbogendrahtspritzen. Das Verfahren wird nach DIN EN 657 in die Kategorie „Beschichten durch thermisches Spritzen“ eingeordnet [DIN05b]. Als Quelle für die thermische Energie dient beim Lichtbogendrahtspritzen die elektrische Energie. Durch die kontaktgebundene Drahtführung und den konischen Zulauf der Spritzdüse entsteht ein Lichtbogen. Die gleichmäßig zugeführten Drähte

aus einer Eisen-Kohlenstoff-Legierung berühren sich im vorderen Bereich der Spritzdüse, es kommt zu einem Kurzschlussstrom und die Drähte werden aufgeschmolzen. Die kinetische Energie des Zerstäubergases (Stickstoff) bewirkt, dass das aufgeschmolzene Spritzmaterial zerstäubt wird und auf die Zylinderlaufbahn trifft, siehe Bild 2.16 [Fahr14].

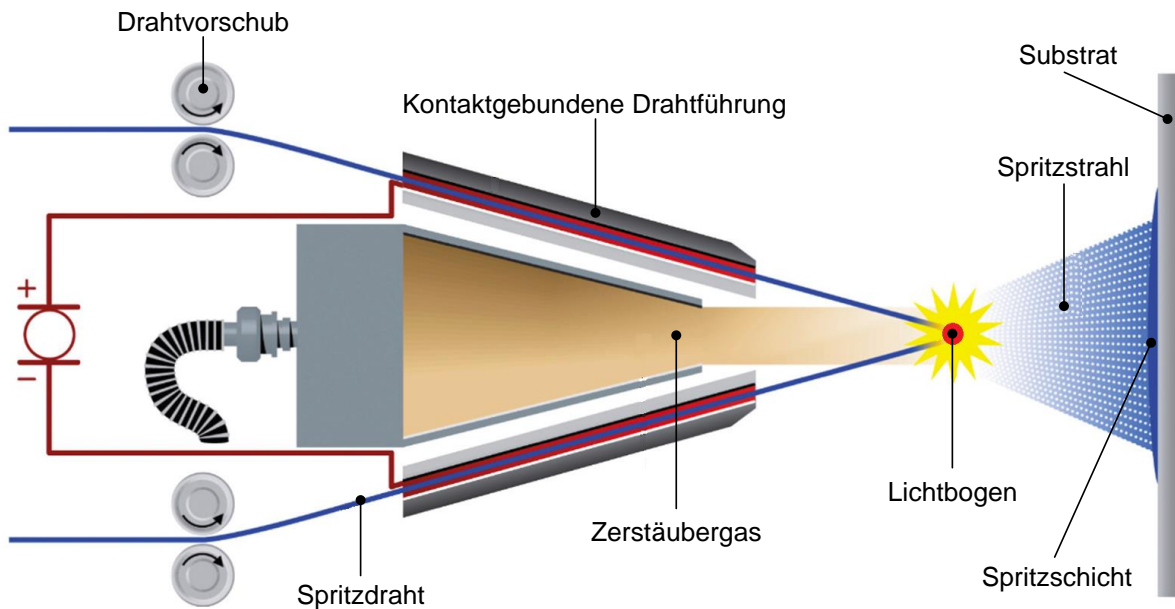


Bild 2.16: Aufbau eines Lichtbogendraht-Spritzsystems [Wern11]

Die flüssigen bzw. teilflüssigen Spritzpartikel treffen mit hoher Geschwindigkeit auf die Oberfläche und füllen die durch die Aktivierung entstandenen Hinterschneidungen. Aufgrund des Temperaturgradienten erstarren die Spritzpartikel schlagartig. Durch das Abkühlen entstehen Schrumpfspannungen an umschlossenen Oberflächenstrukturen. Diese tragen ebenfalls zur Schichthaftung bei. Durch die Überlagerung mehrerer Schichten entsteht eine lamellare Struktur der Schicht. In Bild 2.17 ist schematisch das Auftreffen der Schichtpartikel dargestellt.

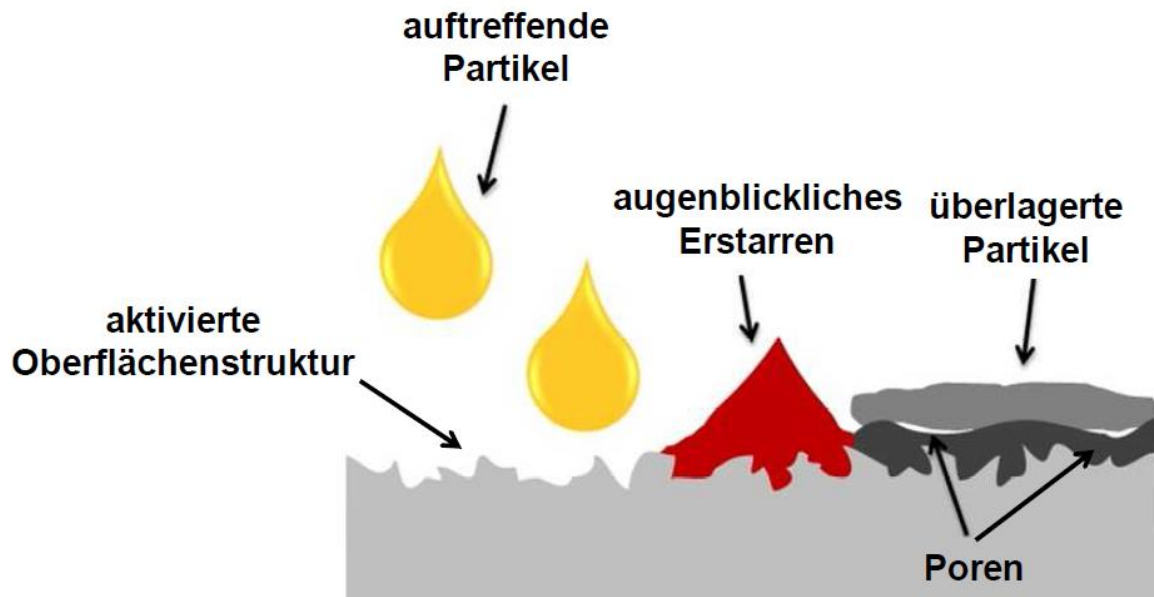


Bild 2.17: Entstehung und Aufbau einer Spritzschicht [Sieg95]

Nach dem Beschichtungsvorgang wird die spritzraue Oberfläche mit einem mehrschneidigen Werkzeug feingedreht. Im Vergleich zu einem Schrupphonprozess mit grober Körnung und hohen Bearbeitungskräften wird durch den wirtschaftlicheren Feindrehprozess eine bessere Qualität der Zylinderbohrung in Bezug auf Rundheit und Rauigkeit erzielt.

Nach dem Feindreihen folgt abschließend ein mehrstufiger Honprozess zur Herstellung einer funktionsfähigen Zylinderlaufbahn. Die Honprozesskette gliedert sich in das zweistufige Zwischenhonen 1 und 2 (ZH1, ZH2) und das Fertig-/Glätthonen (FH, GH). Dabei wird jeweils das ZH 1/2 sowie das FH/GH in einem Doppelaufweitwerkzeug realisiert. Die Prozessführung der Prozessschritte ZH1, ZH2 und FH erfolgt weggesteuert mit Abschaltart Luftmessung. Das GH wird kraftgesteuert mit Abschaltart Zeit durchgeführt. Bei allen 4 Honoperationen kommen Diamanthonsteine zum Einsatz.

## 2.5 Modellierung und Simulation von Hon- und Schleifprozessen

An dieser Stelle werden für die beiden eng verwandten Verfahren mit undefinierter Schneide, Honen und Schleifen, die vielfältigen Ansätze zur Modellierung und Simulation vorgestellt.

### 2.5.1 Ansätze für das Honen

Zurrin nutzt die Methode der finiten Elemente zur Berechnung von Verformungen an einem Grauguss-Zylinder mit einer Wandstärke von 6 mm. Die Untersuchungen beschränken sich dabei auf nur eine Honsteinposition im Zylinder. Zur Beurteilung des Modells werden die Verformungswerte experimentell durch einen induktiven Messtaster erfasst. Es werden Abweichungen von 10-28 % zwischen den berechneten und den gemessenen Verformungen festgestellt [Zurr90].

Tönshoff entwickelt ein Abtragsmodell des Honvorgangs mit daraus abgeleiteter Oberflächenrauigkeit. Das Modell basiert im Wesentlichen auf der Hypothese, dass die Schneidkörner in das Werkstück gedrückt werden und die quer zu Schnittrichtung liegende projizierte Fläche für die Spanbildung maßgeblich ist. Aufgrund der Tatsache, dass der Schneidkornverschleiß sowie die plastische Materialverdrängung bei diesem Modell keine Berücksichtigung finden, werden große Differenzen zwischen realem Abtrag und Modell identifiziert [Töns70].

Mushardt analysiert die an der Bearbeitungsstelle wirkenden Kräfte beim Innen-Rundhonen von Grauguss. Er erkennt, dass die Normalkraft eine zur Beschreibung des Honprozesses geeignete Größe ist, da diese Rundheit und Rauigkeit entscheidend beeinflusst. Er untersucht sowohl kraftabhängige als auch wegabhängige Vorschubkonzepte und stellt eine entsprechende Gleichung für die Normalkraft auf. Bei kraftabhängigem Vorschub ist die Normalkraft während der Bearbeitung konstant, bei wegabhängigem Vorschub ist dagegen ein Kraftanstieg bei Bearbeitungsende zu verzeichnen. Mushardt schlägt eine Prozessführung vor, bei der zu Beginn hohe Normalkräfte wirken, die anschließend während der Bearbeitung reduziert werden [Mush86].

Von See beschreibt zunächst die Honsteintopografie mit der Abbott'schen Traganteilskurve. Darauf aufbauend kann die Honsteintopografie durch Variation der Schärfeparameter an den Honprozess angepasst werden. Ebenso können unterschiedliche Verschleißmechanismen mit der Abbott'schen Traganteilskurve analysiert werden. Weiterhin nutzt von See die Tangentialkraft- bzw. Drehmomentmessungen zur Überwachung unterschiedlicher Kenngrößen des Honprozesses. Über den Schnittkraftkoeffizienten kann durch Kenntnis der Tangentialkraft die Normalkraft bestimmt

werden. Längsformabweichungen können über die hubperiodischen Tangentialkraftschwankungen überwacht werden. Außerdem wird eine Korrelation zwischen Tangentialkraft und Zeitspanvolumen bzw. Tangentialkraftkoeffizient und Oberflächenrauigkeit festgestellt [vSee89].

Schmitt berichtet über die Modellbildung von Kräften beim Präzisionshonen von Bohrungen (Durchmesserbereich 5-20 mm). Ziel der Untersuchungen ist es, die Kraft an der Wirkstelle zwischen Honleiste und Werkstück zu ermitteln. Eine Integration eines Kraftsensors ist bei diesen Durchmessern sehr schwierig. Daher wird der Ansatz verfolgt, die Kraftverhältnisse und das Übertragungsverhalten zu modellieren. Ausgehend von einem bekannten geometrischen Modell wird dieses um Reibeffekte im Werkzeug ergänzt. Schließlich wird ein phasenbezogenes Modell entwickelt, das Reib- und Trägheitseffekte in den unterschiedlichen Phasen des Honprozesses berücksichtigt [Schm15].

Abschließend wird kurz auf das Formhonverfahren eingegangen, bei dem die Kenntnis der wirkenden Kräfte ebenfalls von Bedeutung ist. Bei diesem Verfahren werden die statischen und die dynamischen Verzüge bei der Honbearbeitung vorgehalten, so dass im Betrieb eine ideale Zylinderform der Bohrung vorliegt und dadurch eine Reibungsreduktion erreicht wird. Dies wird über mehrere Leistenpakete, die unabhängig voneinander zustellbar sind, erreicht [Dros12, Dröd18, Hoff14, SchJ04, Weul88, Wien11, Zurr90]. Derartige Prozesse sind nach aktuellem Stand der Technik hinsichtlich Prozesssicherheit und Wirtschaftlichkeit noch als nicht großserientauglich zu bewerten.

### **2.5.2 Ansätze für das Schleifen**

Eine größere Anzahl von Veröffentlichungen widmet sich der Modellierung von Schleifprozessen. Ein zusammenfassender Überblick hierzu wird von Brinksmeier et al. gegeben [Brin06]. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Modellkategorien konkretisiert, siehe auch Bild 2.18.

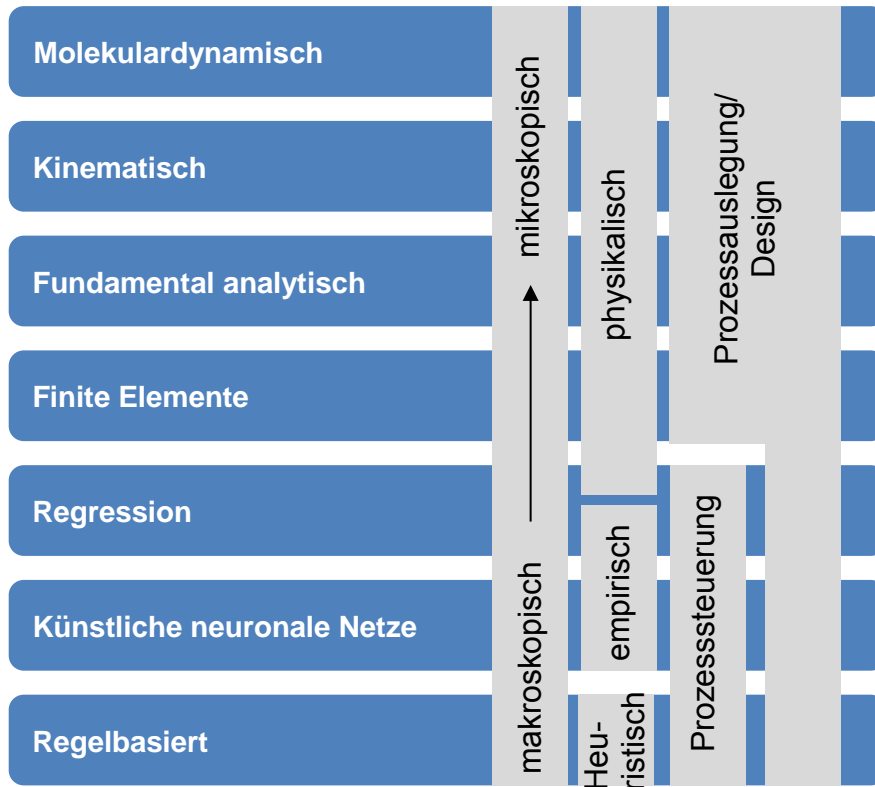


Bild 2.18: Modellkategorien für Schleifprozesse nach [Brin06]

### Fundamental analytische Ansätze

Ein fundamental analytischer Ansatz zielt darauf ab, prädikative Modelle zu entwickeln, die von grundlegenden physikalischen Zusammenhängen abgeleitet sind. Basierend auf dem Wissen über einen Prozess und der Auswahl geeigneter physikalischer Größen können physikalische Modelle durch mathematische Formulierungen entwickelt werden. Hierfür ist ein Verständnis über die Schleifkorn-Werkstück Wechselwirkung erforderlich. Diese Wechselwirkung bestimmt die Materialeinwirkung und den Abtragsprozess und hängt von den tribologischen Eigenschaften des Systems ab. Der Schleifprozess stellt die Summe aller Wechselwirkungen dar und die Modelle müssen die komplexen Beziehungen zwischen der Schleifscheibentopografie, der Prozess-Kinematik und den Eigenschaften des Werkstücks beschreiben.

Grundsätzlich ermöglichen fundamental analytische Ansätze gute Einblicke in den Schleifprozess. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die entwickelten Modelle auf den Umfang der unterschiedlichen Parameter beschränkt sind. Darüber hinaus hängt die Qualität eines Modells von der Genauigkeit bzw. Richtigkeit der experimentell bestimmten Eingangsgrößen ab.



### **Kinematische Modelle**

Typisch für diese Ansätze ist die dreidimensionale Sicht auf den Schleifprozess basierend auf der geometrischen Eindringung der Werkstückoberfläche und der Schleifscheibenoberfläche. Die Modellierung der Schleifscheibentopografie ist ein wesentlicher Bestandteil aller Modelle (Durchschnittswerte und Verteilungen der Korngröße, Kornüberstand etc.). Es existieren zwei prinzipielle Strategien, um eine numerische Beschreibung der Schleifscheibentopografie zu erhalten. Zum einen das tatsächliche Scannen der Schleifscheibenoberfläche, zum anderen die künstliche Erzeugung der Topografie auf Basis statistischer Analysen der Oberfläche. Durch direkte Modellierung eines jeden Schleifkorn-Werkstück-Kontakts kann der lokale Abtrag eines einzelnen Schleifkorns als Funktion der Relativbewegung zwischen Schleifscheibe und Werkstück berechnet werden. Ein tieferer Einblick in ein mikroskopisches Level des Schleifprozesses wird so ermöglicht. König und Steffens entwickelten ein closed-loop Simulationsverfahren auf Basis iterativer Berechnungen mit folgenden Eingangsgrößen: Schleifscheibentopografie, Maschinenparameter und Materialeigenschaften. Als Ausgangsgrößen konnten Normal- und Tangentialkräfte, Werkstücktemperatur sowie Rauigkeit berechnet werden [Köni82, Stef83].

Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades weisen die Modelle eine gute Übereinstimmung mit dem realen Schleifprozess auf. Allerdings ist die Modellierung einer realistischen Schleifscheiben-Topografie mit sehr hohem Aufwand verbunden. Ebenso werden für die komplexen Modelle leistungsstarke Rechner benötigt.

### **Finite Elemente Modelle**

Im Allgemeinen können FE-Modelle für die Simulation von Schleifprozessen in makroskopische und mikroskopische Ansätze unterteilt werden. In den meisten Fällen wird bei der makroskopischen Simulation der Einfluss von Wärme und des Oberflächen-drucks auf das gesamte Werkstück berechnet (Temperaturverteilungen und Formabweichungen). Die Berechnungen basieren hauptsächlich auf thermomechanischen und elastomechanischen Materialeigenschaften. Das plastische Materialverhalten und die Spannbildung werden nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu ist die mikroskopische Simulation auf die Analyse an der Bearbeitungsstelle beschränkt (Korn-ebene). Dabei wird ein kleiner Bereich des Werkstücks und nur ein in Kontakt getretenes Schleifkorn modelliert. Die mikroskopische Simulation stellt die genaueste

Annäherung an den realen Schleifprozess dar. Dabei wird bei einer realistischen Simulation neben einem elastoplastischen Materialverhalten auch die Spannbildung berücksichtigt. Jedoch muss für die Spannbildung das exakte Materialverhalten bei hohen Dehnraten bekannt sein. Um einen Schleifprozess in eine virtuelle Umgebung zu übertragen, ist eine Verringerung der Systemvariablen erforderlich. In diesem idealisierten Modell sind alle relevanten Prozessparameter, Rand- und Übergangsbedingungen integriert. Die Eingangsgrößen für eine typische FE-Simulation sind:

- Werkstückgeometrie
- Materialeigenschaften
- Schleifkräfte
- Wärmeübergangskoeffizient zwischen Kühlschmierstoff und Werkstück
- Kühlungsbedingungen

Die Ausgangsgrößen sind:

- Spannungen
- Temperaturverteilungen
- Thermische und mechanische Deformation

Aufgrund der Komplexität des Schleifprozesses ist der Rechenaufwand sehr hoch, speziell bei der Modellierung einer kompletten Schleifscheibe mit mikroskopischen finiten Elementen auf der Oberfläche. Zur Verifikation der Simulationsmodelle sind Schleifversuche und Werkstoffprüfungen erforderlich. Dies wird aktuell durch die verfügbaren Messtechniken erschwert. Ferner können mit den heutigen Werkstoffprüfungen keine Materialgesetze für einen größeren Parameterbereich abgeleitet werden.

### **Molekulardynamische Modelle (MDM)**

Molekulardynamik-Simulationen auf Basis atomarer Modelle sind attraktiv, um ein tieferes Verständnis über das mikroskopische Materialverhalten und deren Struktur zu erhalten. Unter Berücksichtigung der Mikrostruktur, der Gitterkonstanten, der chemischen Elemente sowie der atomaren Wechselwirkungen erlaubt es die universellere Materialdarstellung in MDM, über die idealen einkristallinen Strukturen oder homogenen Materialeigenschaften hinauszugehen. Das Ziel der MDM-Modellierung ist die detaillierte Beschreibung der Material-Mikrostruktur in Bezug auf die Dynamik und die Wechselwirkungen von atomaren Anordnungen. Mit MDM können Polykristalle

oder Defektstrukturen beschrieben werden. Neben der Kristallstruktur stellen die Potential-Funktionen die zentralen Elemente einer MD-Simulation dar. Diese beschreiben die Wechselwirkung zwischen den Atomen und bestimmen die resultierenden kristallinen Strukturen, die Materialfestigkeit und die Verformungsenergie.

Jedoch ist schon für die Wechselwirkung von einem oder wenigen Schleifkörnern mit einem kleinen Werkstückmodell eine hohe Computer-Leistung erforderlich. Ein weiteres Defizit bei der MDM-Simulation besteht in der Anzahl und Qualität verfügbarer materialspezifischer Potential-Funktionen. Sämtliche möglichen Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen müssen durch eine geeignete Funktion und individuelle Materialeigenschaften beschrieben werden.

### **Physikalisch/Empirische Modelle auf Basis Regressionsanalyse**

Regressionsanalyse ist der Oberbegriff für alle mathematisch-statistischen Methoden, die darauf abzielen, einen funktionalen Zusammenhang zwischen abhängigen Variablen (gemessene Datenpunkte) und einer oder mehreren unabhängigen Variablen zu finden. Dabei repräsentieren die unabhängigen Variablen die Eingangsgrößen des Schleifprozesses, die Ausgangsgrößen und das Bearbeitungsergebnis sind entsprechend die abhängigen Variablen. Aufgrund der Qualität dieser Modelle und den neuen Entwicklungen in Bezug auf die mathematischen Ansätze finden diese Modelle häufig Anwendung und sind auch heute noch auf dem neuesten Stand. Auch die Anforderung an die Rechnerleistung ist im Vergleich zu anderen Modellkategorien sehr niedrig. Jedoch ist eine gute Qualität der Modelle in vielen Fällen mit hohem experimentellem Aufwand verbunden.

### **Modelle auf Basis künstlicher neuronaler Netze (KNN)**

KNN-Modelle heben sich durch mehrere Eigenschaften hervor, die sie für die Modellierung von komplexen nichtstationären Prozessen mit vielen Eingangsgrößen geeignet machen. Bei der Erstellung eines KNN-Modells sind keine analytischen Ausdrücke für die zugrunde liegenden physikalischen Phänomene erforderlich. Das KNN-Modell baut sich automatisch, basierend auf Prozessdaten, durch einen Lernprozess auf. Diese Modelle sind in der Lage, Informationen aus unterschiedlichen Sensoren zu verarbeiten (Sensordatenfusion). Weiterhin können KNN-Modelle erfolgreich mit anderen physikalischen Modellen kombiniert werden, um die Modellleistung zu erhöhen. Zu den wichtigsten KNN-Topologien zur Vorhersage der

Ausgangsgrößen gehören der multilayer perceptron (MLP) und das radial basis function network (RBFN).

Vorteilhaft bei dieser Modellkategorie ist die Fähigkeit, mit sogenannten „weichen“ Eingangsgrößen umgehen zu können (z.B. Kühlmittelart, Düsentyp etc.) und in einem bestimmten Bereich das Inter- und Extrapolieren zu beherrschen. Das Modell lässt sich leicht an unterschiedliche Fertigungsprobleme anpassen und ist in der Lage, eine unvollständige Datenmenge zu verarbeiten. Allerdings ist die Entwicklung einer geeigneten Netzwerkstruktur für KNN-Modelle sehr schwierig und komplex. Folglich ist die Akzeptanz für solche Modelle, gerade in der Industrie, sehr gering.

### **Regelbasierte Modelle**

In den vergangenen Jahren wurden viele Versuche unternommen, die Möglichkeiten von wissensbasierten und fuzzy-logischen Systemen beim Schleifen zu nutzen. Solche Systeme werden meist verwendet, um dem Benutzer eine Empfehlung für die Auswahl von Werkzeug- und Prozessparametern zu geben. Ebenso wird eine Überwachung, Analyse sowie Optimierung des Schleifprozesses ermöglicht. Die wissensbasierten und fuzzy-logischen Systeme nutzten oft Berechnungsmodule auf der Grundlage einer mathematischen Beschreibung (z. B. aus empirischen oder physikalischen Modellen) des realen Prozesses. Regelbasierte Modelle können dazu beitragen, den menschlichen Denkprozess zu modellieren, besonders wenn es um schlecht definierte oder schwierige Probleme geht. Die Fuzzy-Theorie hat die Fähigkeit, das auf menschlicher Erfahrung basierte Wissen zu berücksichtigen, auch wenn die verfügbaren Informationen unvollständig oder undefiniert sind. Für eine realistische Modellierung ist eine anspruchsvolle Wissensbasis wichtig, um gute Vorhersagen für die Qualität der Ausgangsgrößen zu erzielen. In Bezug auf die Simulationsergebnisse hängt die Qualität von der Anzahl der "linguistischen Variablen" ab. Die Simulationsqualität ist für spezifische Anwendungen hoch, jedoch schwierig auf andere Schleifprozesse übertragbar. Darüber hinaus sind die regelbasierten Modelle für Kombinationen mit anderen Modellansätzen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit gut geeignet.

### 2.5.3 Fazit

Ein Großteil der Ansätze zur Modellierung von Honverfahren konnte sich in der Praxis aufgrund großer Abweichungen bisher nicht durchsetzen, so beispielsweise das Abtragsmodell von Tönshoff oder die Bewertung der Honsteintopografie nach von See. Mushardt erkannte die Bedeutung der Normalkraft bei Honprozessen und fand für kraft- und wegabhängige Vorschubsysteme wichtige Zusammenhänge. Bei den Verformungsberechnungen von Zurrin handelt es sich um Prinzipuntersuchungen, da nur ein einfacher Zylinder sowie eine Honsteinposition betrachtet wird. Es bleibt festzuhalten, dass bei allen zuvor erwähnten Ansätzen ausschließlich Grauguss als Bearbeitungswerkstoff zum Einsatz kam.

Bei den Ansätzen für Schleifprozesse finden kinematische Modelle, die FEM-Simulation und Regressionsanalysen teilweise in der Praxis Anwendung. Ein großes Manko aller Modelle ist die erforderliche Rechnerleistung, insbesondere bei Betrachtung der mikroskopischen Schneidkornebene. Ebenso die Komplexität der Modellierung und Handhabung einiger Modelle stellen ein großes Hindernis dar (z.B. molekulardynamische Modelle oder künstliche neuronale Netze).

Vor dem Hintergrund einer praktischen Relevanz in einem Industrieunternehmen sowie der erforderlichen Rechnerleistung kommen im Rahmen dieser Arbeit die Methode der finiten Elemente sowie die Regressionsanalyse zur Anwendung, um die Ursache-Wirkungszusammenhänge bei der Honbearbeitung thermisch beschichteter Zylinderlaufbahnen zu identifizieren.

## 2.6 Statistische Versuchsplanung – Design of Experiments (DoE)

Der Begriff der statistischen Versuchsplanung bezieht sich auf das Festlegen einer Untersuchungs- und Auswertestrategie, die auf mathematisch-statistischen Methoden basiert. Nach herkömmlicher Methode wird bei Versuchen mit mehreren Eingangsgrößen jeweils eine variiert, während die anderen zunächst konstant gehalten werden. Durch ein solches Vorgehen ist die Gesamtzahl der Versuche groß, zudem liegen diese oftmals nicht im Optimalbereich des gesamten Parameterraumes. Es können auch keine Wechselwirkungen der Eingangsgrößen untereinander erkannt werden [Sche97]. Die statistische Versuchsplanung (DoE) dagegen ermöglicht es,

- den Zusammenhang zwischen mehreren Eingangsgrößen und den resultierenden Ausgangsgrößen mit einer minimalen Anzahl an Versuchen zu bestimmen
- einen Prozess mit einer mathematischen Prognosegleichung zu modellieren
- die Wechselwirkungen der Eingangsgrößen untereinander zu ermitteln

Im Folgenden werden wichtige Größen und Begriffe im Rahmen der statistischen Versuchsplanung näher erläutert.

**Faktoren** sind diejenigen Einflussgrößen, die für die Versuchsdurchführung als wesentlich priorisiert wurden, dadurch in den Versuchsplan einfließen und variiert werden. Im Rahmen des Versuchsumfangs ist es oft nicht möglich alle Eingangsgrößen im Versuchsplan zu betrachten.

**Faktorstufen** sind die Anzahl der Werte-Einstellungen der Faktoren. Um Einflüsse der Faktoren zu bestimmen, müssen die einzelnen Faktoren mindestens zwei Stufen im Versuchsplan annehmen, also je Faktor zwei Einstellungen.

**Haupteffekte** geben die Wirkung der einzelnen Faktoren auf das System bzw. die Zielgrößen wieder. Die Berechnung erfolgt dabei formal für einen Faktor, indem die Differenz der Faktorstufenmittelwerte zueinander errechnet wird. Der Effekt quantifiziert also die mittlere registrierte Veränderung der Zielgröße, die beim Wechsel der Faktoreneinstellung von "niedrig" nach "hoch" resultiert.

**Wechselwirkungseffekte** treten dann auf, wenn der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines oder mehrerer anderer Faktoren abhängig ist. Die Wechselwirkungseffekte berechnen sich durch die an der Wechselwirkung beteiligten gemittelten Differenzen der Einzelfaktoren. Wechselwirkungen dritter- und höherer Ordnung sind in den meisten Prozessen nicht signifikant und können vernachlässigt werden [Klep09, Sieb10].

**p-Werte** stellen ein Wahrscheinlichkeitsmaß dar und werden zur Prüfung der statistischen Signifikanz eines Ergebnisses bzw. eines Faktors verwendet. Bei einer DoE wird von folgenden Hypothesen ausgegangen:

- Nullhypothese  $H_0$ : Faktor  $x$  hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ausgangsgröße  $y$
- Alternativhypothese  $H_a$ : Faktor  $x$  hat einen signifikanten Einfluss auf die Ausgangsgröße  $y$

Je kleiner der p-Wert, desto mehr spricht das Ergebnis gegen die Nullhypothese. Ist der p-Wert kleiner als das gewählte Signifikanzniveau  $\alpha$  (z.B. 5 %), so wird die Nullhypothese  $H_0$  abgelehnt, es gilt dann die Alternativhypothese  $H_a$ .

**R-Qd(kor)** ist das Bestimmtheitsmaß oder die Erklärungsrate (0-100 %) der Prognosegleichung eines Modells. Je höher das R-Qd(kor), desto besser ist das Modell an die vorliegenden Daten angepasst.

Ein **Residuum** ist die Differenz zwischen einem beobachteten Wert  $y$  und seinem entsprechenden im Modell angepassten Wert  $y'$ , siehe Bild 2.19. In einer DoE müssen die Residuen auf Normalverteilung und auffällige Muster geprüft werden. Dadurch werden potentielle systematische Modellfehler identifiziert.

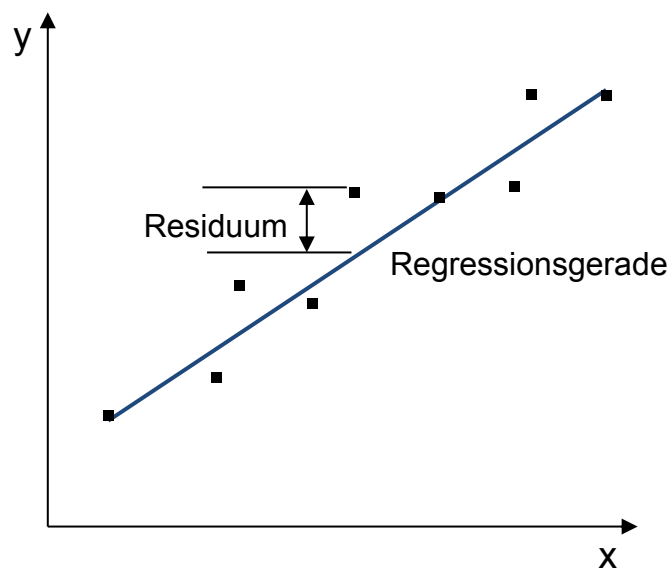


Bild 2.19: Darstellung der Residuen in einer Regression [Sche97]

### 2.6.1 Versuchspläne

Je nach Versuchsziel und Ausgangssituation stehen einem Experimentator unterschiedliche Versuchspläne zur Verfügung, die nachfolgend vorgestellt werden.

**Vollfaktorielle  $2^k$  Versuchspläne** bilden die Grundlage vieler anderer Versuchspläne und können durch ihre zwei Einstellungen je Faktor an den Grenzen des k-dimensionalen Raumes ein lineares Verhalten abbilden ( $k$ =Anzahl der Faktoren). In diesem Versuchsplan werden zudem alle möglichen Faktorkombinationen berücksichtigt und durchgeführt, wodurch die Auswertung von Wechselwirkungseffekten höherer Ordnungen möglich wird. Nachteile der vollfaktoriellen  $2^k$ -Versuchspläne sind vor allem, dass mit ihnen keine Krümmungen dargestellt werden können und ein hoher Versuchsumfang aufgrund der vielen Versuchspunkte resultiert [Klei07].

**Teilfaktorielle  $2^{k-p}$  Versuchspläne**, welche auch Screening- oder fraktionell faktorielle Versuchspläne genannt werden, sind zur Reduzierung von Versuchsumfängen sehr hilfreich. Mit zunehmender Anzahl von Faktoren werden vollfaktorielle Versuchspläne, aufgrund des großen Versuchsumfangs, schnell nicht mehr handhabbar. Bei den teilfaktoriellen Versuchsplänen wird auf die Auswertung von Wechselwirkungen höherer Ordnungen verzichtet, weil diese in der Regel keine Signifikanzen aufweisen und dafür weitere Faktoren im Versuchsplan integriert werden können. Deshalb sind diese Versuchspläne besonders dafür geeignet, um mit wenigen Versuchen möglichst viele Faktoren und deren Haupteffekte zu untersuchen. Bei der Wahl eines Versuchsplans ist darauf zu achten, dass dieser für die Versuchsanforderungen eine geeignete Auflösung besitzt. Die Auflösung ist ein Maß für die Vermengungen der Wechselwirkungseffekte untereinander und zu den Haupteffekten ( $p$  = Anzahl der Vermengungen) [Klei07].

**Zentralpunktversuche** ermöglichen es, aufbauend auf voll- oder teilfaktoriellen Versuchsplänen, nichtlineare Zusammenhänge zu ermitteln. Durch die Einbringung eines Zentralpunktes (CP = center point) in den Versuchsplan erfolgt eine dreistufige Variation der Faktoren, wodurch die Stärke einer Nichtlinearität geprüft werden kann. Der Zentralpunkt bildet oftmals die Ausgangseinstellung einer Versuchsreihe, um in dessen unmittelbaren Umfeld dann optimale Parameterstellungen zu finden [Klei07].

### 2.6.2 Ablauf einer DoE-Versuchsauswertung in Minitab

Im Rahmen dieser Arbeit werden statistische Versuchspläne erstellt und Regressionsmodelle für unterschiedliche Ausgangsgrößen eines Honprozesses ermittelt. Daher wird an dieser Stelle der Ablauf einer Versuchsauswertung mit dem Statistiktool Minitab der Fa. Minitab Inc. erläutert und der Weg zu einem aussagefähigen Regressionsmodell aufgezeigt, siehe Bild 2.20.

Nach Durchführung der Versuche werden die Haupt- und Wechselwirkungseffekte berechnet. Anschließend werden nicht signifikante ( $p$ -Wert  $> 0,05$ ) Faktoren (Haupt- oder Wechselwirkungen) aus dem Modell eliminiert bis alle Faktoren  $p$ -Werte  $< 0,05$  aufweisen. Dabei wird der Faktor mit dem höchsten  $p$ -Wert zuerst aus dem Modell entfernt. Bei dieser schrittweisen Eliminierung kann der Fall eintreten, dass Faktoren, die



im ursprünglichen Modell signifikant sind, im finalen Modell jedoch nicht mehr vorhanden sind. Bei einer Erklärungsrate  $R\text{-Qd(kor)} < 75\%$  können weitere Faktoren in das Modell aufgenommen werden, um  $R\text{-Qd(kor)}$  zu erhöhen. Ebenso kann ein Zentralpunkt zum bestehenden Modell addiert werden, sofern ein quadratischer Einfluss der Eingangsgrößen vermutet wird. Wird anschließend eine Erklärungsrate  $> 75\%$  erreicht, müssen die Residuen auf Normalverteilung geprüft werden. Abschließend können die Haupt- und Wechselwirkungen grafisch analysiert und eine Modellgleichung aufgestellt werden.

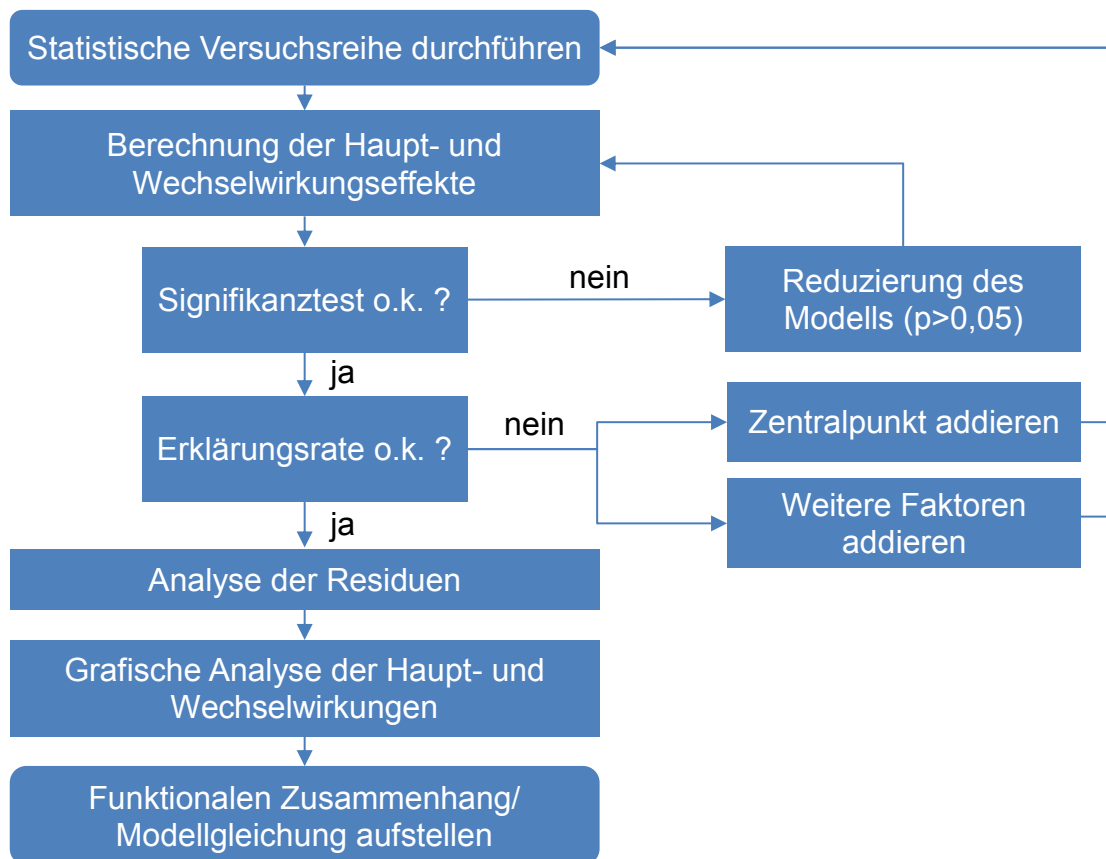


Bild 2.20: Ablauf einer DoE-Auswertung (schematisch)

### 3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

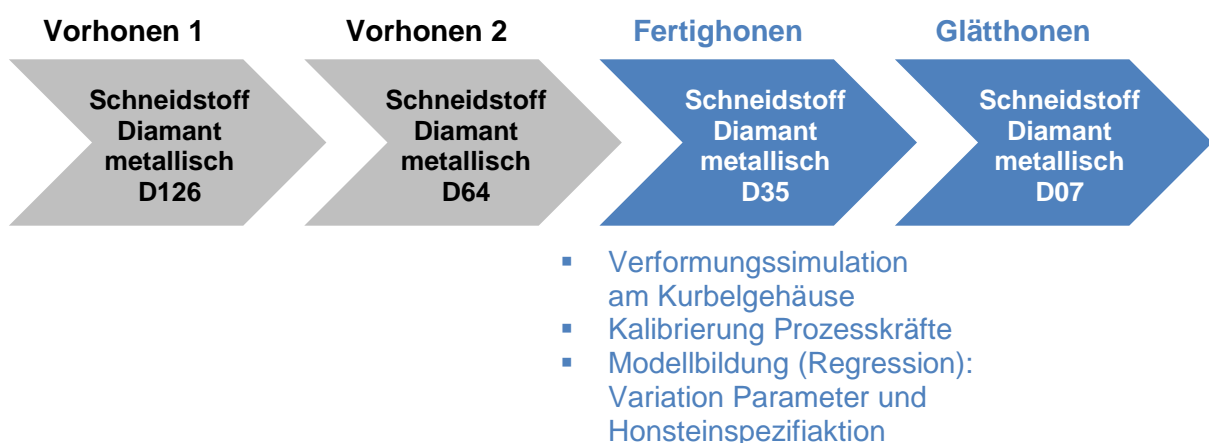
Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen sowie den Prozess- und Ausgangsgrößen beim Honen thermisch beschichteter Zylinderlaufbahnen untersucht. Dabei werden unterschiedliche Methoden der Modellbildung eingesetzt. Im Folgenden werden die zu bearbeitenden Themenschwerpunkte und Zielsetzungen dieser Arbeit näher erläutert, siehe auch Bild 3.1.

Infolge des aktuellen Trends hin zu Aluminium-Kurbelgehäusen mit beschichteten Zylinderbohrungen müssen auch die Honprozesse entsprechend weiterentwickelt werden. Durch die Substitution der kompakten Graugussbuchsen (4 mm Wandstärke) durch eine dünne Schicht (0,1 mm) wird den Normalkräften bei der Honbearbeitung eine besondere Bedeutung beigemessen. Aufgrund unterschiedlicher Steifigkeiten des Kurbelgehäuses entstehen durch die Bearbeitungskräfte Rundheitsabweichungen durch elastische Deformation. Durch den Einsatz der Methode der finiten Elemente werden in einem ersten Schritt die elastischen Zylinder-Verformungen berechnet. Aufbauend auf einem Werkzeugmodell werden die wirkenden Normalkräfte berechnet, welche die Eingangsgrößen in das Simulationsmodell darstellen. Den berechneten Verformungen werden anschließend reale Rundheitsmessungen gegenübergestellt, bewertet sowie der Nutzen des Simulationsmodells aufgezeigt.

In einem zweiten Schritt werden die während der Honbearbeitung wirkenden Kraftkomponenten mit Hilfe geeigneter Messtechniken erfasst und mit den entsprechenden Prozessdaten der Maschine kalibriert. Das Ziel dieser Kalibrierung ist es, in Zukunft auf aufwändige Messaufbauten zur Prozesskraftanalyse zu verzichten. Anschließend wird für den Schneidstoff Diamant im Fertighonprozess der Einfluss der Eingangsgrößen (Maschinenparameter und Schneidstoffzusammensetzung) auf die Ausgangsgrößen (Prozesskräfte und Oberflächenrauigkeit) unter Anwendung statistischer Regressionsmodelle analysiert.

In einem weiteren Schritt wird im Fertig- und Glätthonprozess aus primär qualitativen Gründen der Schneidstoff Diamant durch Siliziumkarbid substituiert. Das in seiner Struktur unregelmäßige Siliziumkarbidkorn erzeugt eine definierte Schnittstruktur und soll die Porenöffnung positiv beeinflussen. Darüber hinaus sind die SiC-Schneidstoffkosten um den Faktor 10 geringer als die des Diamantprozesses. Der Fokus wird zunächst auf den weggesteuerten Fertighonprozess gelegt. Das Ziel ist es, die Ursache-Wirkungszusammenhänge beim Honen einer thermischen Spritzschicht mit Siliziumkarbid zu untersuchen. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen soll durch geeignete Parametrierung und Schneidstoffspezifikation ein serientauglicher Fertighonprozess qualifiziert werden. Des Weiteren wird in dem letzten Prozessschritt Glätthonen der Einfluss der Maschinenparameter auf die Oberflächenkennwerte der fertigen Funktionsoberfläche durch statistische Regressionsmodelle analysiert. Abschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Siliziumkarbidhonung durchgeführt.

### Diamanthonung



### Siliziumkarbidhonung

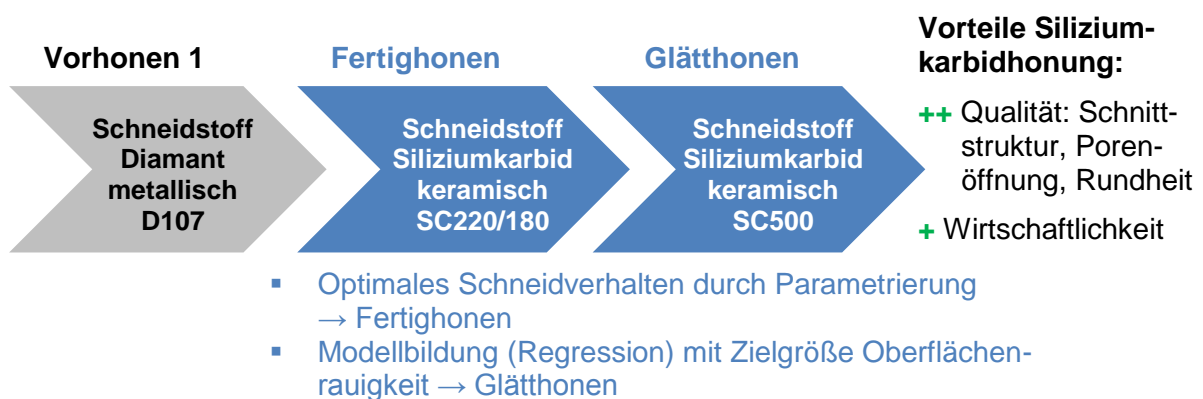


Bild 3.1: Themenschwerpunkte der Dissertation

## 4 Rahmenbedingungen für die Bearbeitungsversuche

Nachfolgend werden die bei den Versuchen eingesetzten Honmaschinen, Werkzeuge und Versuchswerkstücke vorgestellt. Ebenso wird in diesem Kapitel das verwendete Messequipment näher erläutert.

### 4.1 Honmaschinen

#### 4.1.1 Honmaschine Nagel VARIOHONE 2

Bei den Bearbeitungsversuchen in Kapitel 5 und 6 kommt die Honmaschine VARIOHONE 2 VSM 8-60 SV-NC der Firma Nagel zum Einsatz, siehe Bild 4.1. Die zweispindelige Maschine besitzt einen elektromechanischen Hubantrieb mit Kugelrollspindel zur Realisierung der Axialbewegung sowie einen automatischen Werkzeugwechsler (Magazin mit 8 Werkzeugplätzen). Die Aufweitung erfolgt dabei sowohl primär als auch sekundär durch eine Elektro-Mechanische-Zustellung (EMZ). Die Maschine verfügt über das Prozessdaten-Analyse-Tool TwinCAT Scope View zur Aufzeichnung und Auswertung sämtlicher Maschinendaten.



Bild 4.1: Nagel Honmaschine VARIOHONE 2 VSM 8-60 SV-NC

In Tabelle 4.1 sind die wichtigsten Kenndaten der Honmaschine dargestellt:

Tabelle 4.1: Maschinendaten Nagel VARIOHONE 2 VSM 8-60 SV-NC

Arbeitsbereich	
Hondurchmesser [mm]	40-100
Honlänge max. [mm]	200
Hub-und Spindeltrieb	
Anzahl der Honspindeln	2
Hublänge [mm]	5-600
Hubantrieb	elektromechanisch
Hubgeschwindigkeit [m/min]	0-38
Hubregelung	stufenlos
Spindel-Drehzahl [1/min]	0-1000
Zustellung	
Zustellsystem	elektromechanisch durch Servomotor
Aufweitungen	2
Steuerung	
Honsteuerung	MS-U4
Prozessdatenanalyse	TwinCAT Scope View

#### 4.1.2 Honmaschine Gehrung Z400-125

Die bei den Versuchsreihen zur Entwicklung der Siliziumkarbidhonung in Kapitel 7 verwendete Honmaschine ist ein Fabrikat des Maschinenherstellers Fa. Gehrung und trägt die Bezeichnung Z400-125, siehe Bild 4.2.



Bild 4.2: Gehrung Honmaschine Z400-125

Die einspindelige Maschine, deren Axialbewegung durch einen hydraulischen Hubantrieb realisiert wird, verfügt über einen schwenkbaren Rüsttisch. Der Werkzeugwechsel erfolgt manuell. Als Zustellsysteme kommen primär die Elektro-Mechanische-Zustellung (EMZ) und sekundär die hydraulisch automatische Zustellung (HAZ) zum Einsatz. Eine Aufzeichnung und Visualisierung der Normalkraft kann an dieser Honmaschine über das kalibrierte analoge Steuerspannungssignal des Zustellmotors realisiert werden. In Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Kenndaten der Honmaschine aufgeführt:

Tabelle 4.2: Maschinendaten Gehring Z400-125

<b>Arbeitsbereich</b>	
Hondurchmesser [mm]	50-125
Honlänge max. [mm]	250
<b>Hub-und Spindeltrieb</b>	
Anzahl der Honspindeln	1
Hublänge [mm]	15-400
Hubantrieb	hydraulisch
Hubgeschwindigkeit [m/min]	0-33
Hubregelung	stufenlos/frequenzgeregelt
Spindel-Drehzahl [1/min]	80-600
<b>Zustellung</b>	
Zustellsystem	EMZ/HAZ
Meßsteuerung	Diacontrol AP
<b>Steuerung</b>	
Gehring Honsteuerung GHC II	
Siemens S7-300	CPU 315-2 DP

## 4.2 Honwerkzeuge

### 4.2.1 Fertighonwerkzeug Fa. Nagel

Bei dem in Kapitel 5 eingesetzten Werkzeug handelt es sich um ein Mehrleistonwerkzeug mit Doppelaufweitung (Durchmesser 83 mm). Das Werkzeug weist einen Konuswinkel von  $25^\circ$  auf und verfügt über Messdüsen für das maßgesteuerte Honen. Die beiden Aufweitungen können mit jeweils 6 Honsteinen bestückt werden, siehe Bild 4.3. Da in den jeweiligen Versuchen nur der Fertighonprozess von Interesse ist, wird lediglich die erste Aufweitung mit entsprechenden Versuchs-Diamanthonsteinen bestückt. Die zweite Aufweitung (Glätthonprozess) ist bei den Versuchen nicht aktiviert.





**Eingesetzte Honsteine in Kapitel 6**  
(Modellbildung für Schneidstoff Diamant)

Schneidstoff Diamant in metallischer Bindung		
Korngröße [ $\mu\text{m}$ ]	Konzentration [Volumen-%]	Füllstoffanteil [%]
D35	50	0
D35	30	0
D35	80	0
D35	50	10
D35	50	20

Bild 4.3: Doppelaufweitendes Fertighonwerkzeug Fa. Nagel

#### 4.2.2 Fertighonwerkzeug Fa. DFH

Bei der Qualifizierung des Fertig- und Glätthonens mit Siliziumkarbid in Kapitel 7 wird ebenfalls ein Mehrleistenhonwerkzeug mit Doppelaufweitung verwendet (Durchmesser 83 mm). Der Konuswinkel des luftmessend ausgeführten Werkzeugs beträgt  $25^\circ$ . Die beiden Aufweitungen werden bei den Bearbeitungsversuchen mit jeweils 6 SiC-Fertighonsteinen und 6 SiC-Glätthonsteinen bestückt, siehe Bild 4.4.



**Eingesetzte Honsteine in Kapitel 7**  
(Modellbildung für Schneidstoff Siliziumkarbid)

Schneidstoff Siliziumkarbid in keramischer Bindung			
	Maschenzahl (mesh)	Bindung (Härte)	Bezeichnung in der Arbeit
<b>Fertighoner</b> (Aufweitung 1)	SC220	N	SC220
	SC180	J	SC180_1
	SC180	K	SC180_2
<b>Glätthoner</b> (Aufweitung 2)	SC500	J	SC500

Bild 4.4: Doppelaufweitendes Fertighonwerkzeug Fa. DFH

### 4.3 Versuchswerkstücke und Vorrichtungen

#### 4.3.1 OM654 Zylinderkurbelgehäuse

Bei den Versuchen zur Verformungssimulation in Kapitel 5 kommt das Zylinderkurbelgehäuse OM654 (Dieselmotor) von Mercedes-Benz als Versuchswerkstück zum Einsatz. Das in closed-deck ausgeführte Kurbelgehäuse besitzt 4 Zylinder in Reihenbauweise und wird im Sandgussverfahren aus dem Werkstoff AlSi8Cu3 hergestellt. Die Zylinder nummerierung erfolgt von der Steuer- zur Getriebeseite, siehe Bild 4.5. Der Zylinderdurchmesser beträgt 82 mm.

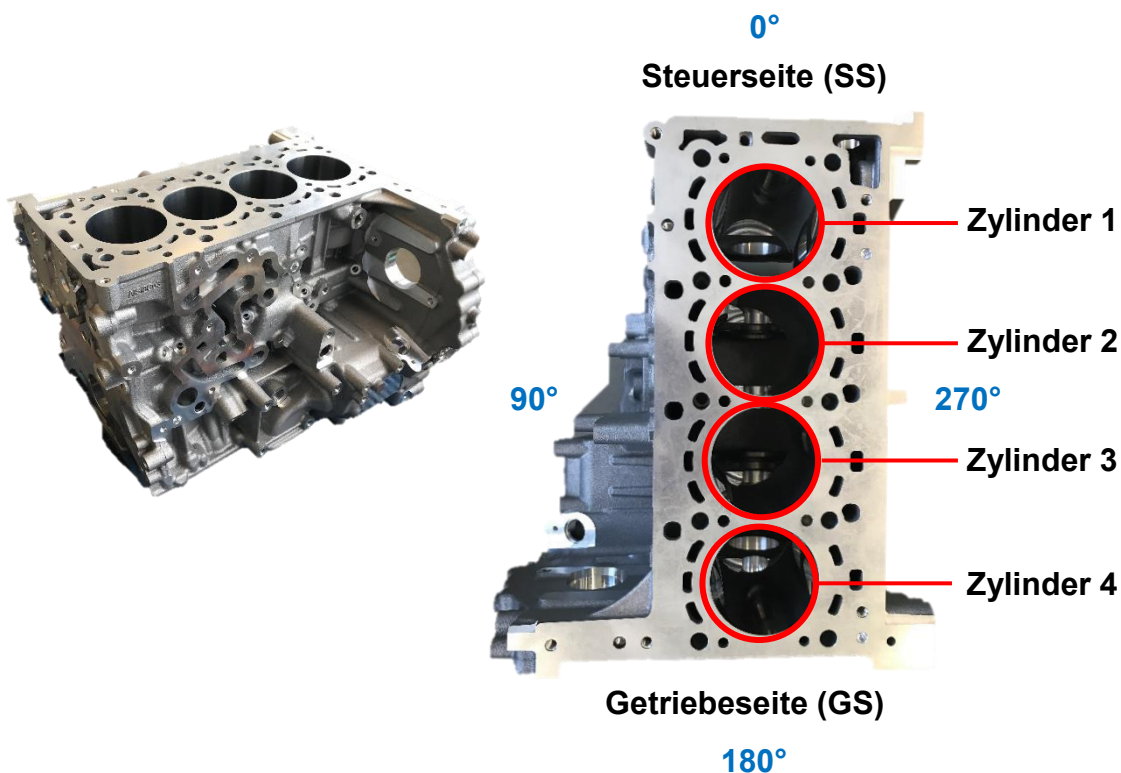


Bild 4.5: Versuchswerkstück KGH OM654

#### 4.3.2 M133 Zylinderkurbelgehäuse

Bei der Entwicklung der Siliziumkarbidhönung in Kapitel 7 wird das 4-Zylinder-Kurbelgehäuse M133 (Ottomotor) der Fa. AMG als Versuchswerkstück verwendet, siehe Bild 4.6. Das closed-deck Kurbelgehäuse mit einem Zylinderdurchmesser von 83 mm wird in einem Kokillen-Kippgussverfahren aus dem Aluminiumwerkstoff AlSi7Mg hergestellt. Die Zylinder nummerierung und -orientierung entspricht der des OM654 Kurbelgehäuses.



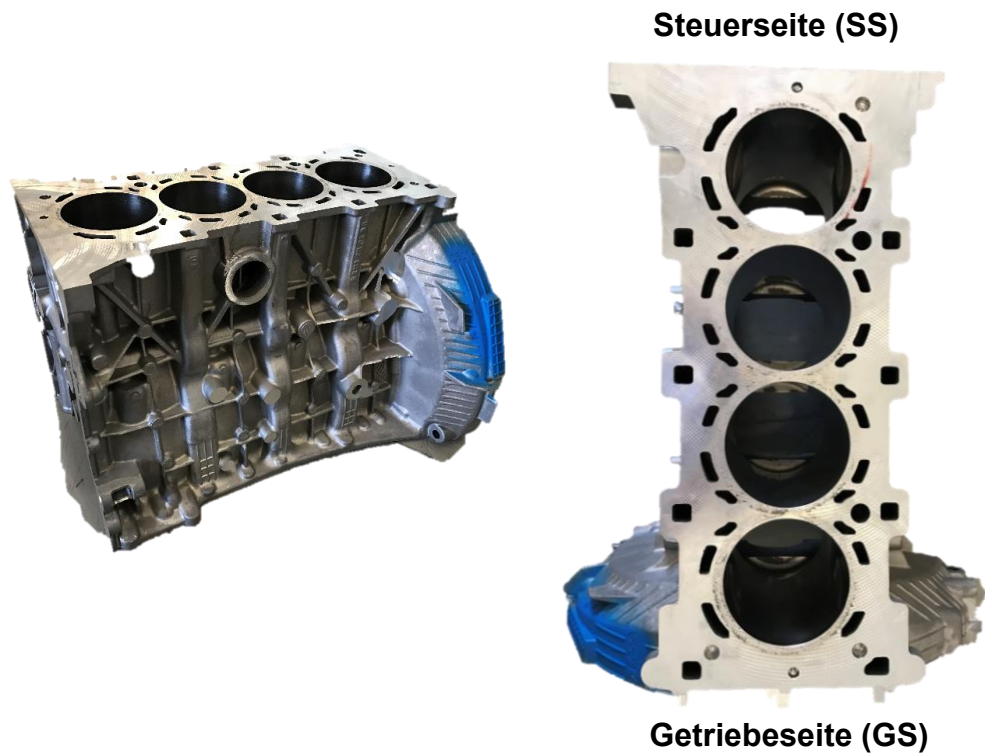


Bild 4.6: Versuchswerkstück KGH M133

### 4.3.3 Vorrichtung für Versuchsbuchsen

Bei den Versuchsreihen zur Kalibrierung der Bearbeitungskräfte mit Hilfe von Maschinendaten (Kapitel 6) kommt eine speziell konzipierte Vorrichtung zum Einsatz, in der entsprechende Versuchsbuchsen pneumatisch gespannt werden können, siehe Bild 4.7. Die Vorrichtung wird auf einem piezoelektrischen 4-Komponenten-Dynamometer befestigt, welches folgende Größen erfasst:

1.  $M_z$  → hieraus wird die tangentielle Kraftkomponente  $F_{ct}$  bestimmt
- 2:  $F_z$  → entspricht der axialen Kraftkomponente  $F_{ca}$
- 3:  $F_x/F_y$  → diese Größen sind in diesem Kontext nicht relevant

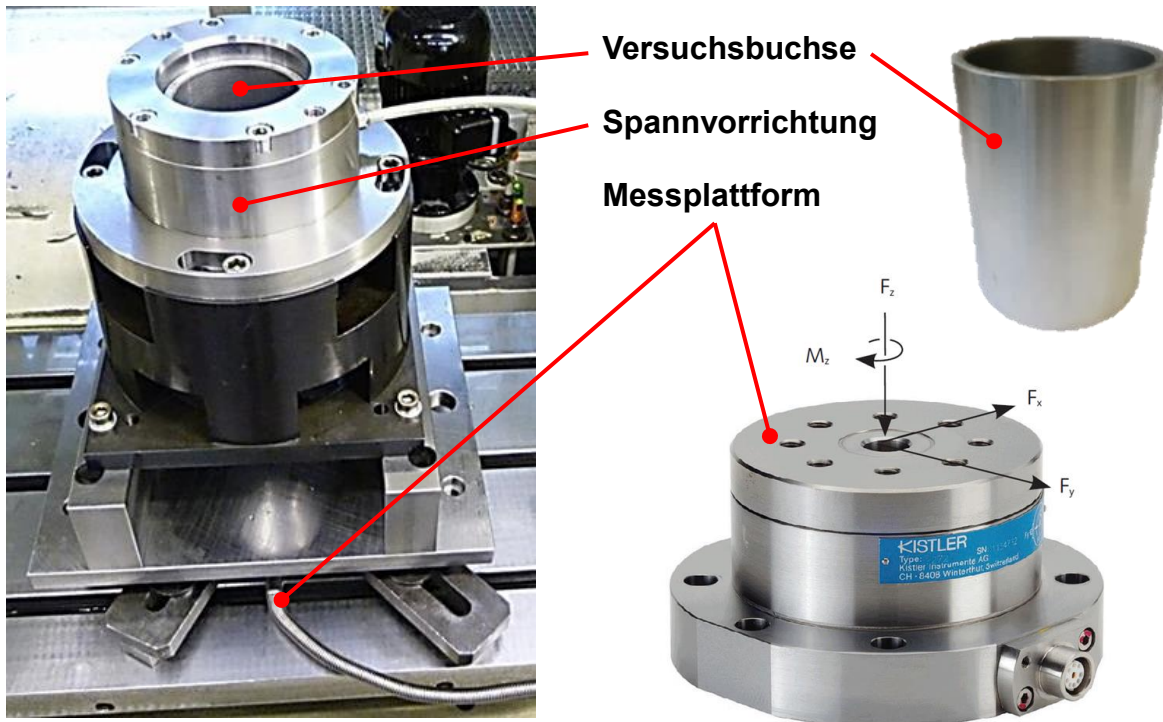


Bild 4.7: Versuchsaufbau zur Kalibrierung von  $F_{ca}$  und  $F_{ct}$

## 4.4 Messequipment und Messtechnik zur Qualitätssicherung

Die messtechnische Erfassung der Bewertungsmerkmale bildet die Grundlage für die Beurteilung des Bearbeitungsergebnisses und bestimmt somit direkt die erreichbare Werkstückqualität. In diesem Abschnitt werden daher die zur Qualitätssicherung der Zylinderlaufbahnen angewandten Kennwerte und Messeinrichtungen näher beschrieben.

### 4.4.1 Oberflächenkennwerte für thermische Spritzschichten

Zur Beurteilung der Oberflächenstruktur thermischer Spritzschichten werden bei der Daimler AG die speziellen Oberflächenkennwerte  $R6sB$  und  $V\text{-Öl}$  verwendet. Die Einführung dieser speziellen Kennwerte war notwendig, da Oberflächenkennwerte aus der Norm ( $R_z$ ,  $R_k$ -Kenngrößen) die besonderen Anforderungen der gehobenen Oberflächentopografie (Porosität) nicht erfüllen. Zur detaillierten Bewertung der Oberfläche erfolgt nach einem unternehmensinternen Algorithmus eine Strukturtrennung des Primärprofils nach Honstruktur (Bearbeitungsprofil) und Porenstruktur (Vertiefungsprofil), siehe Bild 4.8 [Daim14].

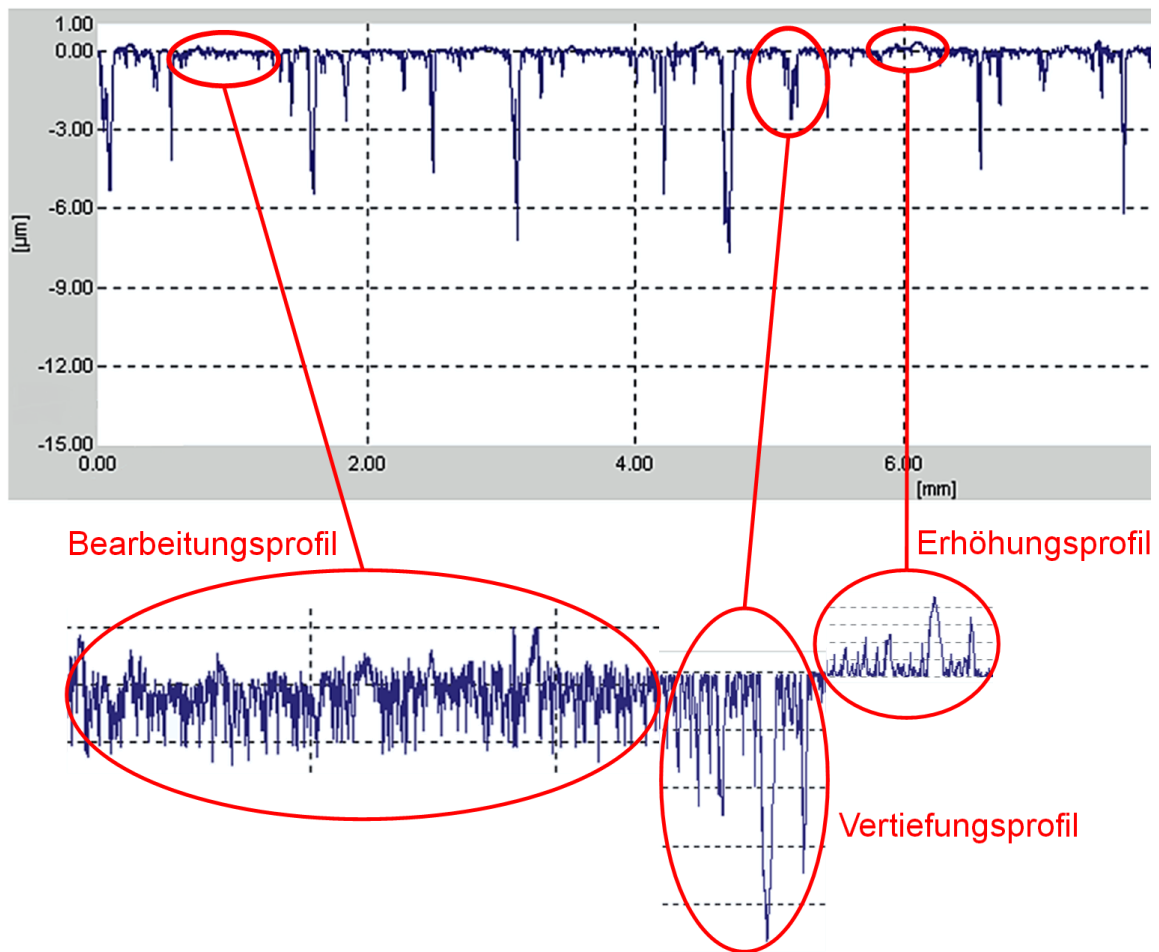


Bild 4.8: Strukturtrennung des Oberflächentastschriebs [Daim14]

Basis für die Strukturtrennung sind Profilschnitte von Oberflächen, die keine Porosität aufweisen und nur von einer Bearbeitungsstruktur gekennzeichnet sind. Dabei wird für den Datensatz der Profiltiefenwerte die Schiefe der Häufigkeitsverteilung bestimmt. Die Schiefe gibt die Neigungsstärke der statistischen Verteilung der Profiltiefenwerte an. Die mit der porenlosen Oberfläche ermittelte Schiefe ist charakteristisch für das jeweilige Bearbeitungsverfahren. Diese Soll-Schiefe ist der entscheidende Parameter bei der Strukturseparation. In einem ersten Schritt der Separierung wird eine Startlinie an der tiefsten Stelle des Messprofils definiert, parallel zur Mess-Grundlinie. Anschließend werden in Richtung der Mess-Grundlinie Zwischenlinien in bestimmten Abständen definiert, wobei für jede Zwischenlinie die Schiefe der Häufigkeitsverteilung der Profiltiefenwerte ermittelt wird. In einem weiteren Schritt erfolgt ein Vergleich der berechneten Schiefe jeder Zwischenlinie mit der Soll-Schiefe. Bei der Zwischenlinie, deren Schiefe der Soll-Schiefe entspricht, werden alle Profiltiefenwerte, die von der Zwischenlinie angeschnitten werden, digital aus dem Gesamt-Profilschnitt selektiert

und zusammenhängend in einem Poren-Profileschnitt dargestellt. Ein weiteres Resultat dieser Separierung ist der Profilschnitt der Bearbeitung, siehe Bild 4.9 [Daim14].

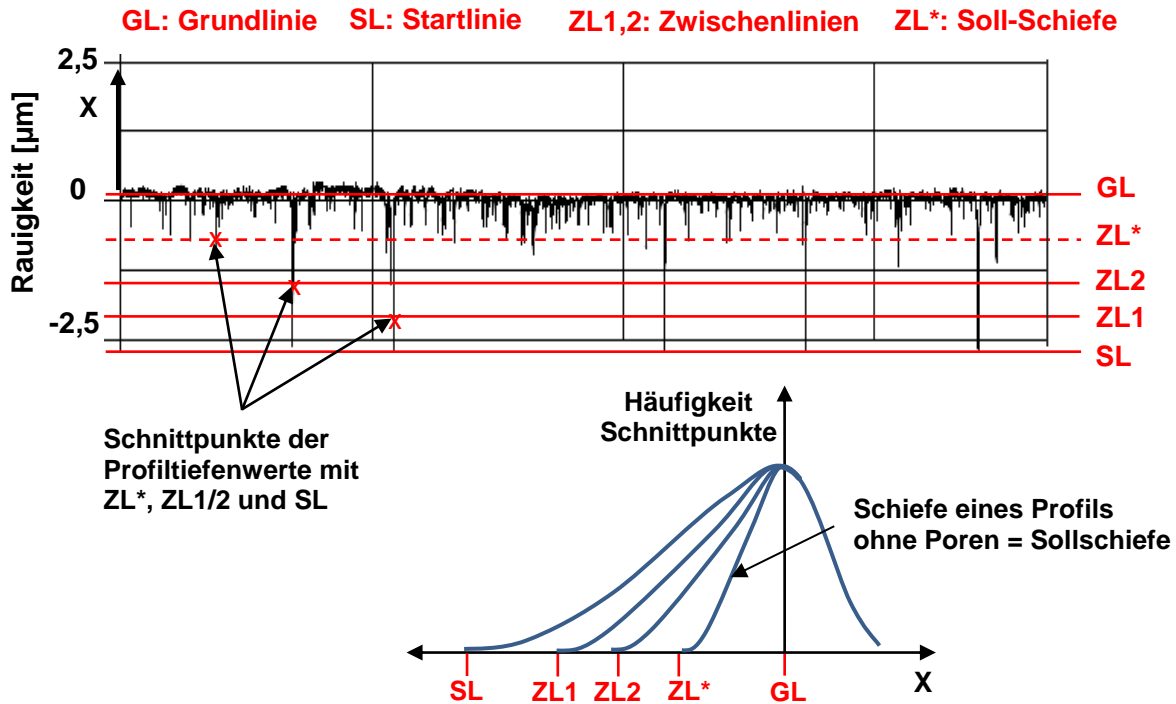


Bild 4.9: Visualisierung des Algorithmus zur Strukturtrennung [Daim14]

Die Strukturtrennung nach Bearbeitungs- und Porenprofil bildet die Grundlage für die Kennwertberechnung des theoretischen Ölhaltevolumens  $V\text{-Öl}$ . Die Ermittlung der Kennwerte  $V\text{-Öl-Honen}$  (Bearbeitung) und  $V\text{-Öl-Poren}$  (Porosität) erfolgt auf Basis der näherungsweise simulierten Bewegung des Kolbenrings auf der Zylinderlaufbahn unter Anwendung eines mathematisch-morphologischen Verfahrens. Dabei wird das Abrollen eines Kreises mit definiertem Radius auf dem Profilschnitt simuliert. Die Fläche zwischen der Abrolllinie und dem Oberflächenprofil ist ein Maß für die zur Schmierung relevante Ölmenge. Durch Projektion dieser Fläche in die dritte Dimension kann ein theoretisches Ölhaltevolumen der Oberfläche berechnet werden, siehe Bild 4.10. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der Ergebnisse, auch bei unterschiedlich langen Profilschnitten, wird das berechnete Volumen auf  $1 \text{ mm}^2$  normiert [Daim14].

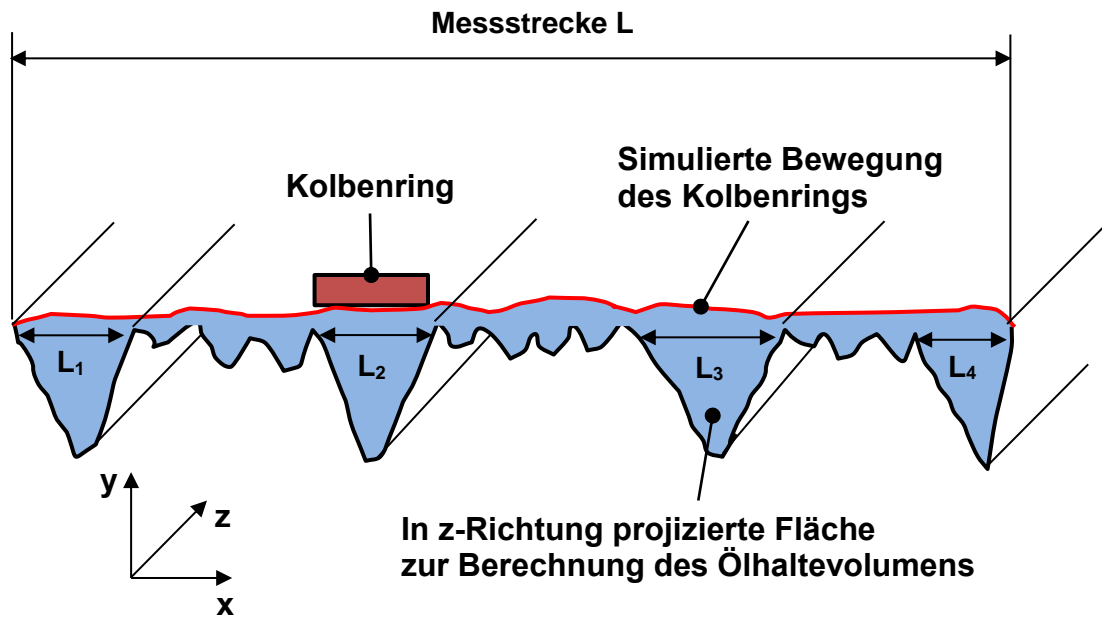


Bild 4.10: Prinzipdarstellung der simulierten Kolbenringbewegung auf einer Oberfläche

Nachfolgend sind die wichtigsten Kennwerte zur Beurteilung thermischer Spritzschichten zusammengefasst:

**V-Öl-Honen [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]:** Dieser Kennwert beschreibt das Ölrückhaltevolumen der Honstruktur und damit auch die Rauigkeit der Oberfläche.

**V-Öl-Poren [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]:** Mit diesem Kennwert wird das Ölrückhaltevolumen der Poren wiedergegeben (Vertiefungsprofil).

**Porenlängenanteil [%]:** Dieser Kennwert ist als Quotient der Summe der Porenlängen ( $L_1, L_2, \dots$ ) und der Messstrecke  $L$  definiert (siehe auch):

$$\text{Porenlängenanteil [\%]} = \frac{L_1 + L_2 + L_3 + L_4}{L} \quad (4.1)$$

**R6sB [ $\mu\text{m}$ ]:** Dieser Kennwert wird aus dem strukturgetrennten und anschließend hochpassgefilterten Bearbeitungsprofil berechnet und ist ein Maß für die vertikale Ausprägung der Bearbeitungsstruktur. R6sB entspricht der Höhe vom sechsfachen der Standardabweichung des Bearbeitungsprofils und wird vor allem bei Vorprozessen ermittelt (Schrupphonen, Zwischenhonen, Fertighonen) [Merc09].

Die Orientierung der Messstrecken in der Zylinderbohrung ist in Bild 4.11 visualisiert. Es werden je Zylinder 6 Messstrecken in unterschiedlichen Tiefen mit der Tastschnittmessung erfasst. Bei der Auswertung der Oberflächenkennwerte gilt folgende Vorschrift:

- Kennwert V-Öl-Honen: Maximal-Wert der 6 Messstrecken
- Kennwerte V-Öl-Poren und Porenlängenanteil: Mittelwert der 6 Messstrecken

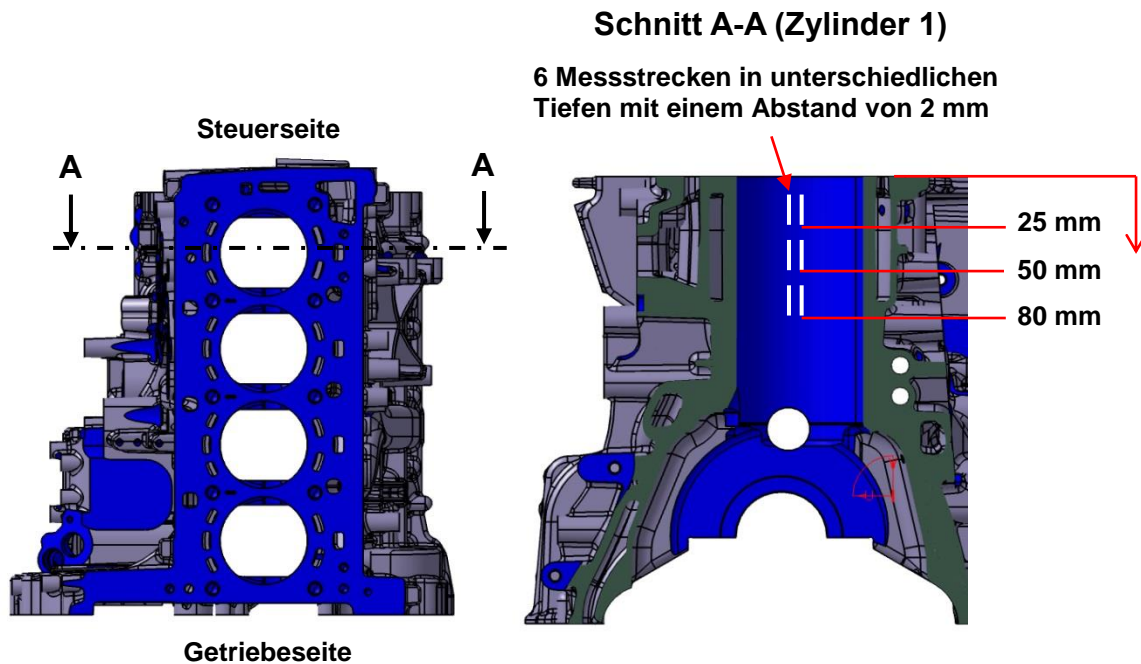


Bild 4.11: Darstellung der Messstrecken in der Zylinderbohrung

#### 4.4.2 Oberflächenmessgerät Hommel T8000

Die Überprüfung der geforderten Oberflächenkenngrößen wurde mit dem stationären Rauheitsmessgerät Hommel T8000 der Firma Hommel-Etamic GmbH durchgeführt, siehe Bild 4.12. Über das Tastschnittverfahren können neben verschiedenen Profil-, Rauheits- und Welligkeitskennwerten auch die speziellen Kennwerte R6sB und V-Öl der Daimler AG ermittelt werden. Zur Erfassung der relevanten Kennwerte verfährt ein Diamant-Konturtaster über die Oberfläche. Beim Abfahren des Oberflächenprofils wird durch die vertikale Bewegung der Tastspitze mittels induktivem Wegmesssystem eine Spannungsänderung aufgezeichnet. Diese wird in ein der Auslenkung proportionales Signal und somit in eine Oberflächenmaßzahl umgewandelt.





Bild 4.12: Rauheitsmessgerät Hommel T8000

#### 4.4.3 Weißlichtinterferometrie

Zur qualitativen Beurteilung der Topografie der gehonten Endoberfläche wird ein Messgerät verwendet, welches auf der Messtechnik der Weißlichtinterferometrie (WLI) basiert. Die Funktion des WLI beruht auf der Interferenz (Überlagerung) von Lichtstrahlung. Es wird ein Lichtstrahl von einer Lichtquelle ausgesendet, der über einen Strahlteiler in Mess- und Referenzwelle aufgeteilt wird. Die Referenzwelle wird auf einen Referenzspiegel und die Messwelle auf das zu untersuchende Objekt geleitet. Die von Referenzspiegel und Messobjekt reflektierte Strahlung überlagert sich anschließend und wird von der Kamera aufgenommen. Durch die unterschiedlich langen Wege, die Referenz- und Messwelle zurückzulegen haben, ergeben sich Interferenzen, deren Auswertung die Höheninformationen der gemessenen Oberfläche liefern [Heri06]. Über eine entsprechende Farbskalierung lassen sich Poren, Honriefen sowie Verschmierungen auf der Oberfläche identifizieren. Bild 4.13 illustriert den prinzipiellen Aufbau eines Weißlichtinterferometers sowie eine WLI-Aufnahme einer fertiggehonten Oberfläche (Diamanthonung).

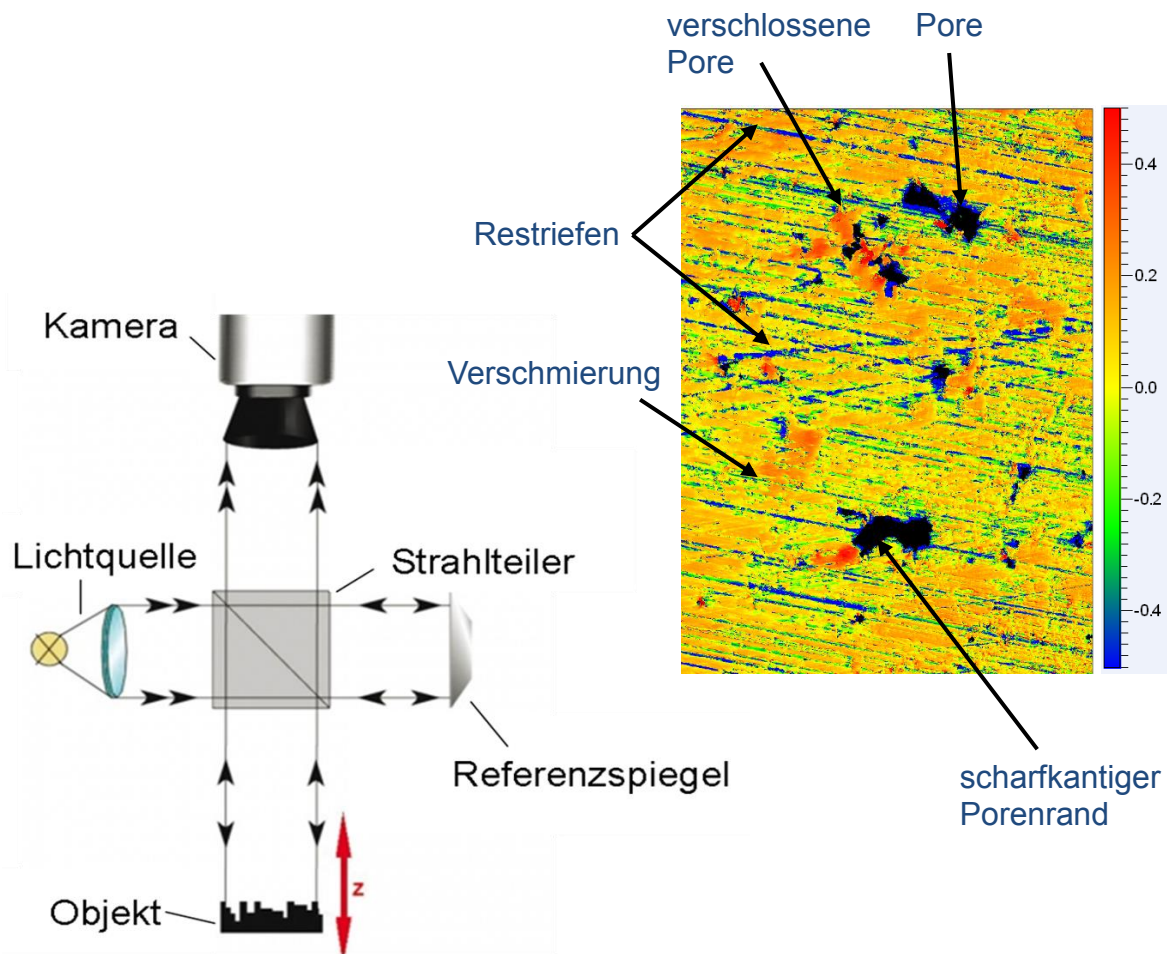
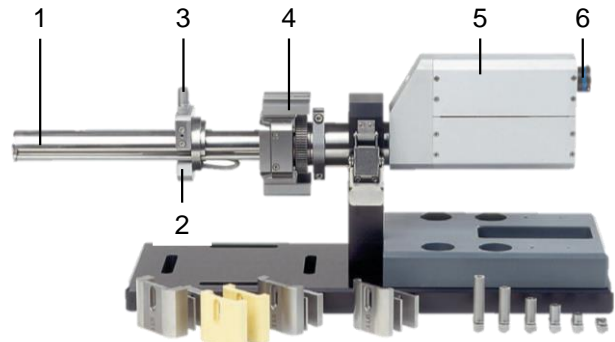
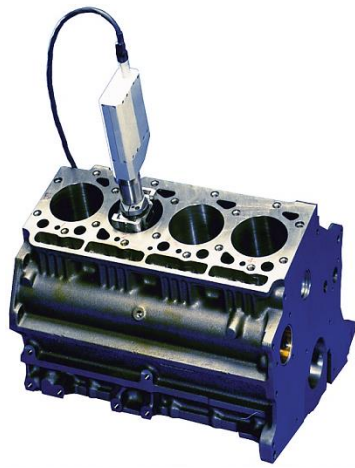


Bild 4.13: Schematischer Aufbau eines Weißlichtinterferometers (links) [Heri06]; WLI-Aufnahme einer Diamanthonung (rechts)

#### 4.4.4 Formmessgerät V-Incometer

Für die Formmessungen der Zylinderbohrungen wird ein flexibles Messsystem der Fa. Hommel-Etamic verwendet, siehe Bild 4.14. Mit dem V-Incometer kann die Zylinderform (Rundheit, Geradheit, Parallelität) sowie der Durchmesser von Zylinderbohrungen erfasst werden. Die Anpassung an unterschiedliche Zylinderabmessungen wird durch spezielle Spannbacken realisiert. Es handelt sich um ein taktils Messverfahren. Die Auslenkung der Tastkugel, die entlang der Bohrungswand verfährt, wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die erfassten Messsignale werden entsprechend den definierten Auswertebedingungen ausgewertet und visualisiert.





- |               |                            |
|---------------|----------------------------|
| 1. Messwelle  | 4. Spannbacken             |
| 2. Messkopf   | 5. Gehäuse mit Antrieb     |
| 3. Messspitze | 6. Stecker für Sondenkabel |

Bild 4.14: Messsystem V-Incometer (links: eingebauter Messzustand, rechts: Detailansicht)

## 5 Verformungssimulation am Zylinderkurbelgehäuse

Wie bereits erwähnt, spielt die Bearbeitungskraft bei der Auslegung eines Honprozesses gerade bei Aluminium-Kurbelgehäusen mit beschichteten Zylinderbohrungen eine wichtige Rolle. Die unterschiedlichen Steifigkeiten/Wandstärken der Zylinderbohrung haben bei einer Schichtdicke von ca. 0,1 mm einen großen Einfluss auf die Formabweichungen (Rundheit und Geradheit) [Karp15]. Die Bearbeitungskraft ist je nach Zustellsystem eine Stell- oder Prozessgröße. Bei kraftgesteuerten Zustellsystemen liegen die Honsteine mit einer konstanten definierten Kraft an der Bohrungswand an, so dass die Zustellgeschwindigkeit aus der fortschreitenden Zerspanung gegeben ist. Die Bearbeitungskraft stellt somit eine Stellgröße dar. Bei der weggesteuerten Zustellung wird bei vorgegebener radialer Zustellgeschwindigkeit in Abhängigkeit des Abtragsvermögens des Honsteins die erforderliche Prozesskraft aufgebracht.

Eine Erhöhung der Bearbeitungskraft hat immer das Ziel, die Abtragsrate des Honsteins zu erhöhen, was eine Reduzierung der Taktzeit zur Folge hat. Höhere Bearbeitungskräfte haben allerdings negative Auswirkungen auf die Qualität der Zylinderbohrung. Zum einen kann durch ein aggressives Schneidverhalten die Oberflächenrauigkeit ansteigen, zum anderen entstehen durch elastische Deformationen Rundheits- und Geradheitsabweichungen.

### 5.1 Theoretische Grundlagen und Hypothesen

Wie aus Bild 5.1 ersichtlich, weist die Zylinderbohrung in Längs- und Umfangsrichtung unterschiedliche Wandstärken/Steifigkeiten auf (rote Bereiche: geringe Wandstärke, blaue Bereiche: hohe Wandstärke).

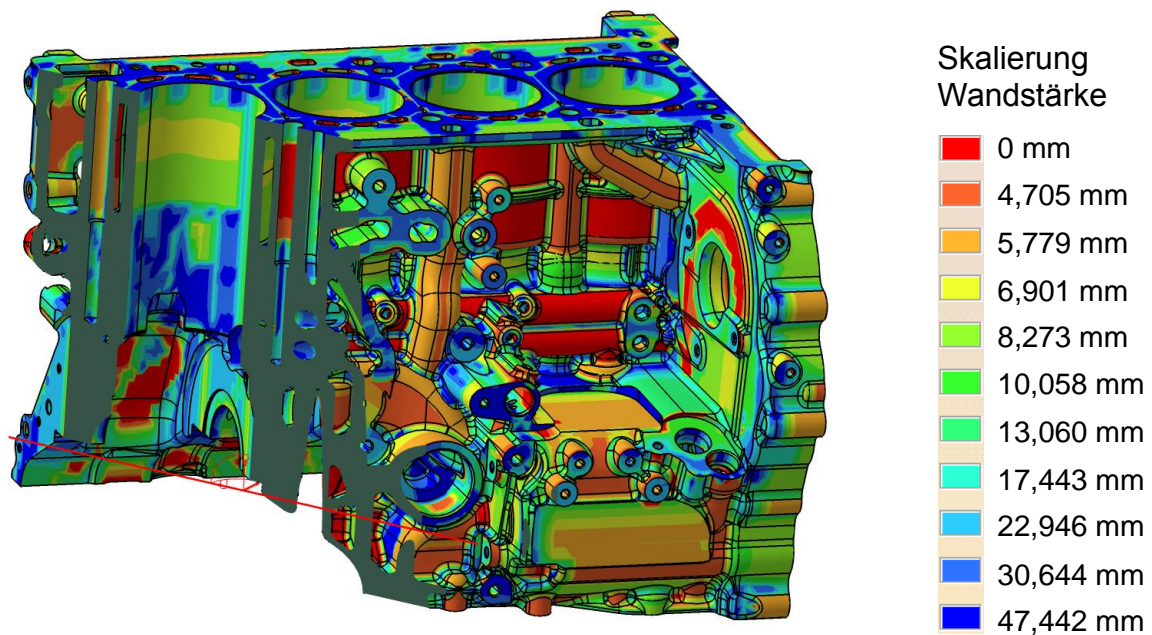


Bild 5.1: Wandstärkenanalyse eines Zylinderkurbelgehäuses (Schnittdarstellung)

Während des Honprozesses unterliegen die Bereiche geringer Steifigkeit einer höheren elastischen Verformung als die steiferen Bereiche, siehe Bild 5.2. Ebenso sind die Zerspanungsraten in labilen Bereichen geringer als in stabilen Bereichen. Das Ergebnis sind unterschiedliche Durchmessermaße und damit Rundheitsabweichungen (radial) oder Geradheitsabweichungen (axial).

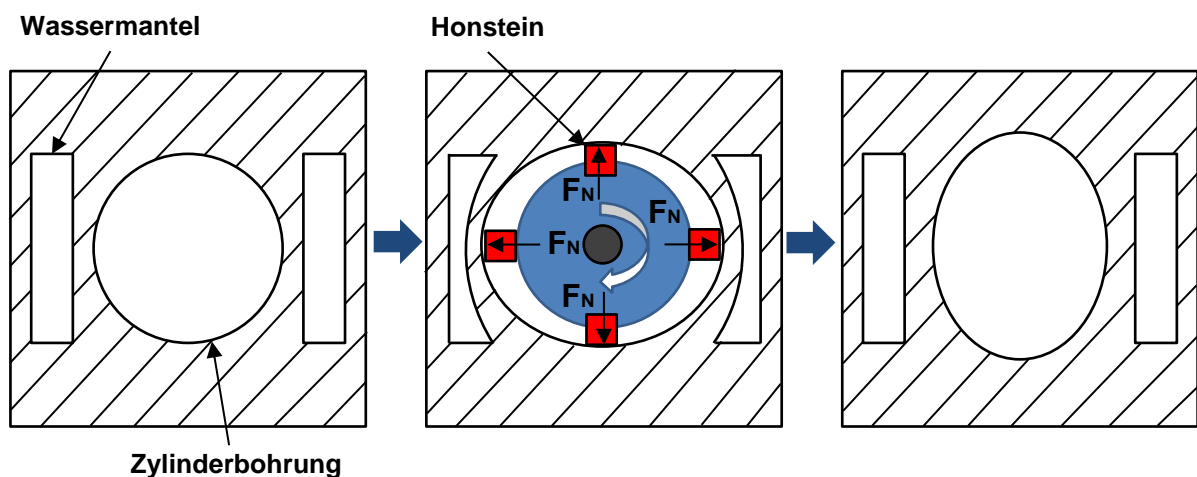


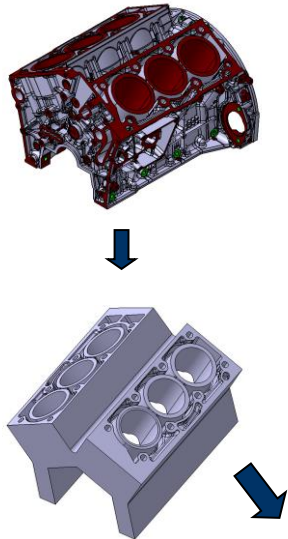
Bild 5.2: Verformung durch Bearbeitungskräfte (Prinzipdarstellung)

## 5.2 Modellierung des Honprozesses

Bevor mit der Berechnung der Verformungen gestartet werden kann, müssen zunächst die an der Bearbeitungsstelle wirkenden Kräfte berechnet werden. Dabei kommt ebenfalls die FEM-Methode zur Anwendung. Die berechneten Kräfte stellen

die Eingangsgrößen des Simulationsmodells dar, welches aus einem abstrahierten Werkzeug- und Kurbelgehäusemodell besteht, siehe Bild 5.3.

### Kurbelgehäuse-Modell



### Werkzeug-Modell mit Kräften

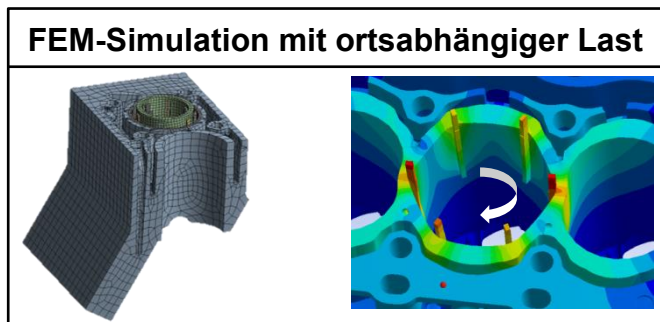
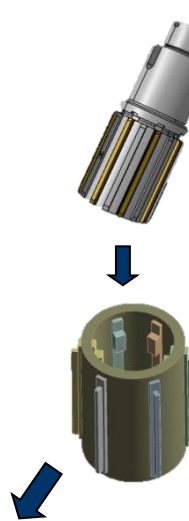


Bild 5.3: Komponenten des Honprozessmodells

Für die im Honprozess wirkende Kraft an der Zustelleinheit, welche von der Maschine auf die Zustellstange des Werkzeugs übertragen wird, werden die an der Bearbeitungsstelle wirkenden Kräfte der 6 Honsteine berechnet. Für alle Kontaktflächen zwischen Konus und Honsteinträger, sowie zwischen Honsteinträger und Werkzeug wird ein Reibungskoeffizient von  $\mu = 0,1$  (Paarung Stahl-Stahl) zu Grunde gelegt. Bei einer Kraft an der Zustelleinheit  $F_{\text{Zustell}}$  von ca. 3000 N ergeben sich Honstein-Kräfte von ca. 650 N, siehe Bild 5.4.

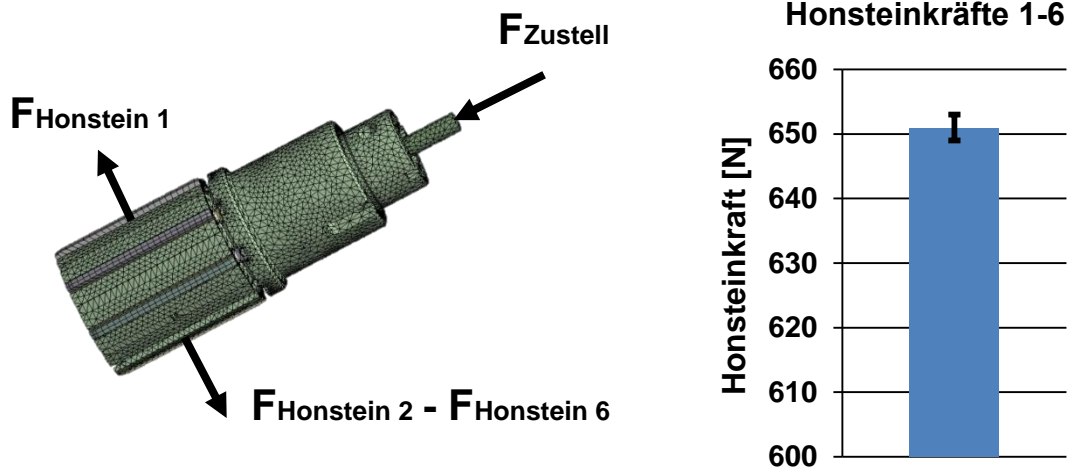


Bild 5.4: Berechnung der Honsteinkräfte

Zur Verifizierung des Modells werden die an den Honsteinen wirkenden Kräfte mit Hilfe einer speziellen Vorrichtung sowie einer Kraftmessdose messtechnisch erfasst. Dabei wird bei unterschiedlichen Aufweitmomenten des Zustellmotors die Kraft an einem Leistenpaar gemessen, die anderen zwei Leistenpaare kommen bei der Kraftübertragung nicht zum Einsatz. Für die Berechnung der einzelnen Honstein-Kraft muss folglich die gemessene Kraft durch 3 dividiert werden. Es ergibt sich eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen FEM-Berechnung und Messung (Berechnungsabweichung von ca. 6 %), siehe Bild 5.5. Die ermittelten Kräfte stellen somit die Eingangsgrößen für das Simulationsmodell dar. Ein ähnliches Messkonzept zur Ermittlung der Honstein-Kräfte mit speziellen Messbügeln und Dehnungsmessstreifen entwickelte Welzel [Welz14]. Einen weiteren Ansatz zur Messung der Normalkraft direkt im Werkzeug wird von Schweig vorgestellt [Schw14].

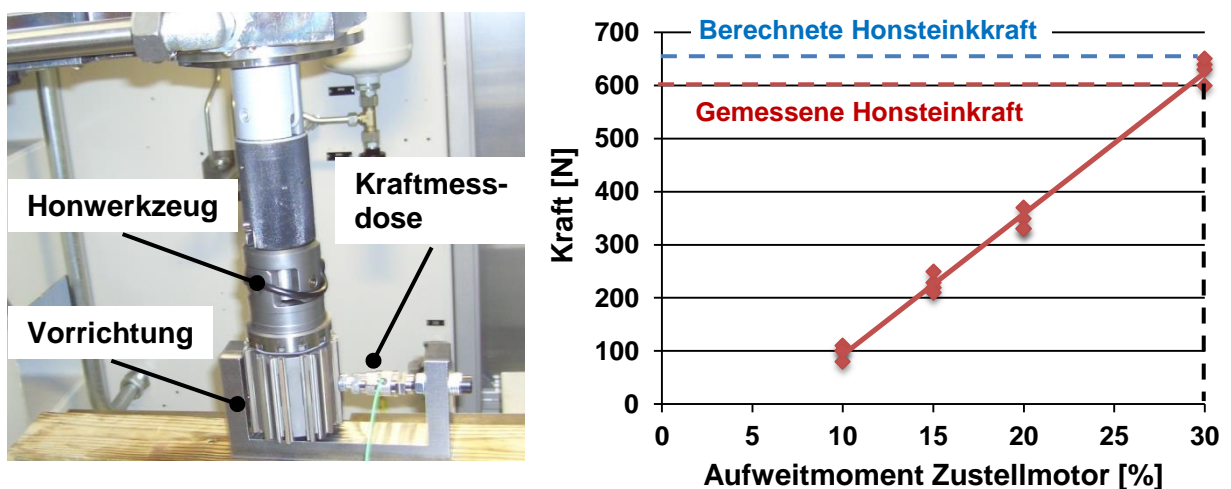


Bild 5.5: Messsystem zur Kalibrierung der Honsteinkraft

Um den Einfluss der 0,1 mm dicken LDS-Schicht auf die spätere Verformungs-Simulation zu bestimmen, wird zunächst eine Prinziprechnung durchgeführt. Dabei werden an einem Zylinder die Verformungen mit sowie ohne LDS-Schicht berechnet. Die Last von 500 N wird in diesem vereinfachten Modell nur über eine Honleiste eingeleitet. Hintergrund dieser Berechnung ist die Reduzierung der Elemente-Anzahl bei der Vernetzung. Dadurch kann die Rechenzeit verringert werden. Der Einfluss der Schicht auf die Verformungen beträgt ca. 5 % und wird daher bei den weiteren Simulationsrechnungen vernachlässigt, siehe Bild 5.6.

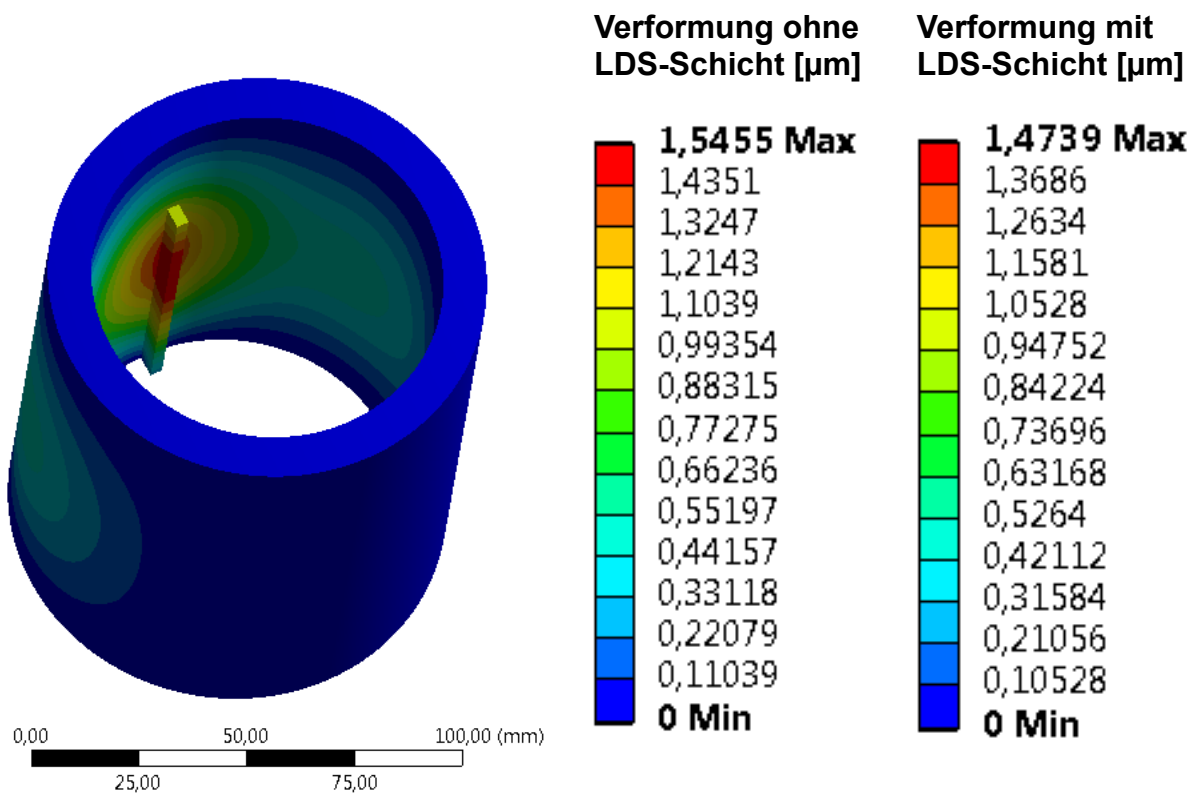


Bild 5.6: Einfluss der LDS-Schicht auf die Verformungen

### 5.3 Berechnung der Zylinderverformungen durch Bearbeitungskräfte

Zur Verifizierung der Berechnungsergebnisse werden zunächst Honversuche durchgeführt, um die realen Rundheitsabweichungen zu bestimmen. Das Versuchswerkstück (KGH OM654) wird an der Nagel-Honmaschine VARIOHONE bearbeitet. Als Schneidstoff kommt metallisch gebundener Diamant mit einer Korngröße von 25  $\mu\text{m}$  zum Einsatz, siehe Bild 5.7.



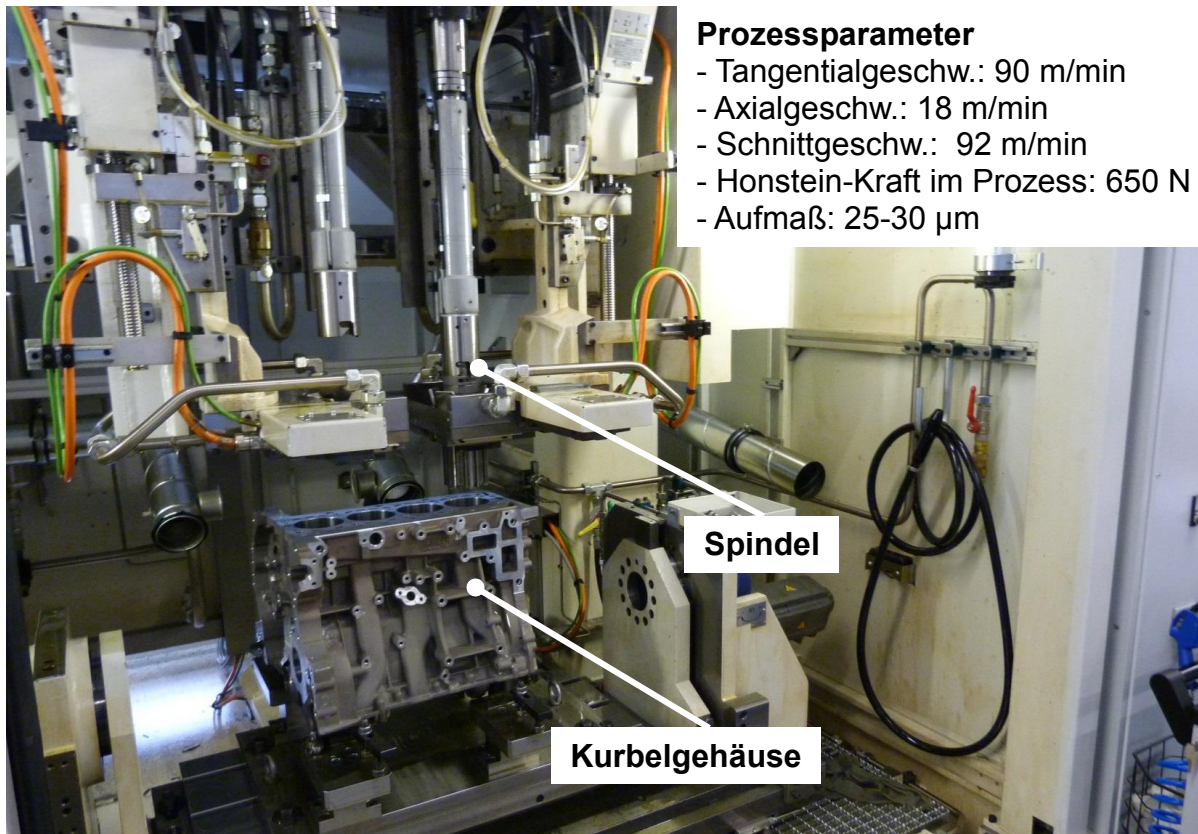


Bild 5.7: Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Rundheitsabweichungen

Anschließend wird die Form der 4 Zylinderbohrungen mit dem V-Incometer gemessen. Bild 5.8 zeigt die Mittelwerte der Rundheitsabweichungen von 5 KGH. Es ist ersichtlich, dass die Ebene 4 (50 mm unterhalb der Zylinderkopftrennfläche) in allen 4 Zylindern die höchsten Werte aufweist.

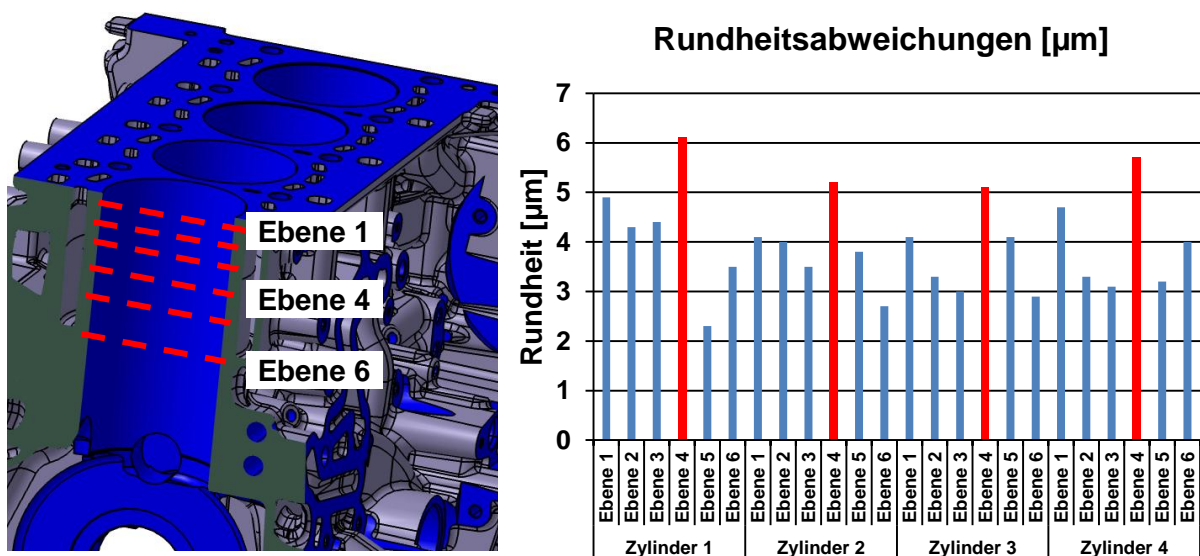


Bild 5.8: Rundheitsabweichungen von 5 Kurbelgehäusen (Mittelwerte)

Die FEM-Berechnungen werden auf diesen kritischen Ebenen durchgeführt, da hier höhere Verformungen des Kurbelgehäuses zu erwarten sind. Die Berechnungen werden mit dem Softwarepaket Ansys Workbench durchgeführt. Es handelt sich um eine statisch-mechanische Analyse mit folgenden Eingangsgrößen:

- Honstein-Kraft: 650 N
- Honstein-Geometrie: 80×6×3 mm
- Kurbelgehäusegeometrie
- Dichte des Kurbelgehäuses (Aluminium): 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Dichte der Honsteine (Stahl): 7800 kg/m<sup>3</sup>
- Elastizitätsmodul Aluminium: 70000 MPa
- Elastizitätsmodul Stahl: 210000 MPa

Um die Verformungen in Abhängigkeit vom Zylinderwinkel zu bestimmen, wird eine ortsabhängige Last definiert. Die Position der Honleisten wird nach jedem Berechnungsschritt um 0,5° verändert, um den gesamten Umfang des Zylinders zu erfassen. Ferner werden die Berechnungen in der Hublage des oberen Umkehrpunktes durchgeführt, weil hier der Anpressdruck am höchsten ist. Die Überlauflänge der Honsteine beträgt ca. 1/3 der Länge (25 mm). In Bild 5.9 ist die Modellierung des Honprozesses für Zylinder 1 dargestellt. Die Verformungen werden in allen 4 Zylindern jeweils auf der kritischen Ebene berechnet.

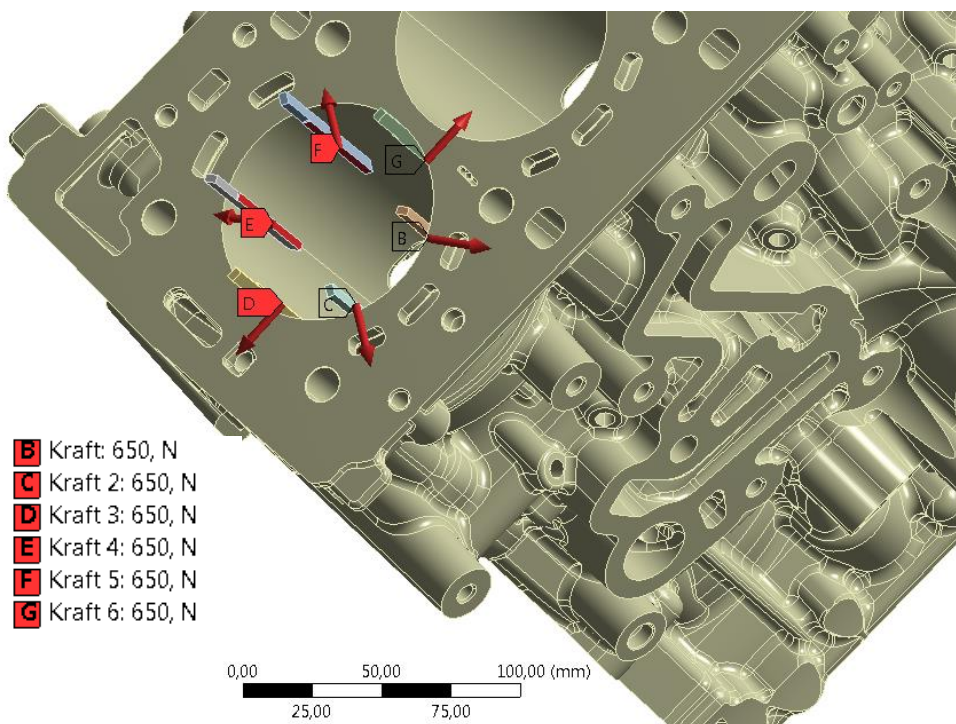


Bild 5.9: Honprozessmodellierung für Zylinder 1



## 5.4 Berechnungsergebnisse und Interpretation

In Bild 5.10 sind die Verformungs-Ergebnisse der FEM-Berechnung den realen Rundheitsabweichungen gegenübergestellt. Die x-Achse stellt eine Abwicklung des Zylinders dar. Die vertikale Primärachse repräsentiert den Abstand zwischen dem Messwert der Formmessung und dem Nennmaß dar. Die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Wert ist somit die Rundheitsabweichung in dieser Ebene. Auf der vertikalen Sekundärachse sind die berechneten Verformungen dargestellt.

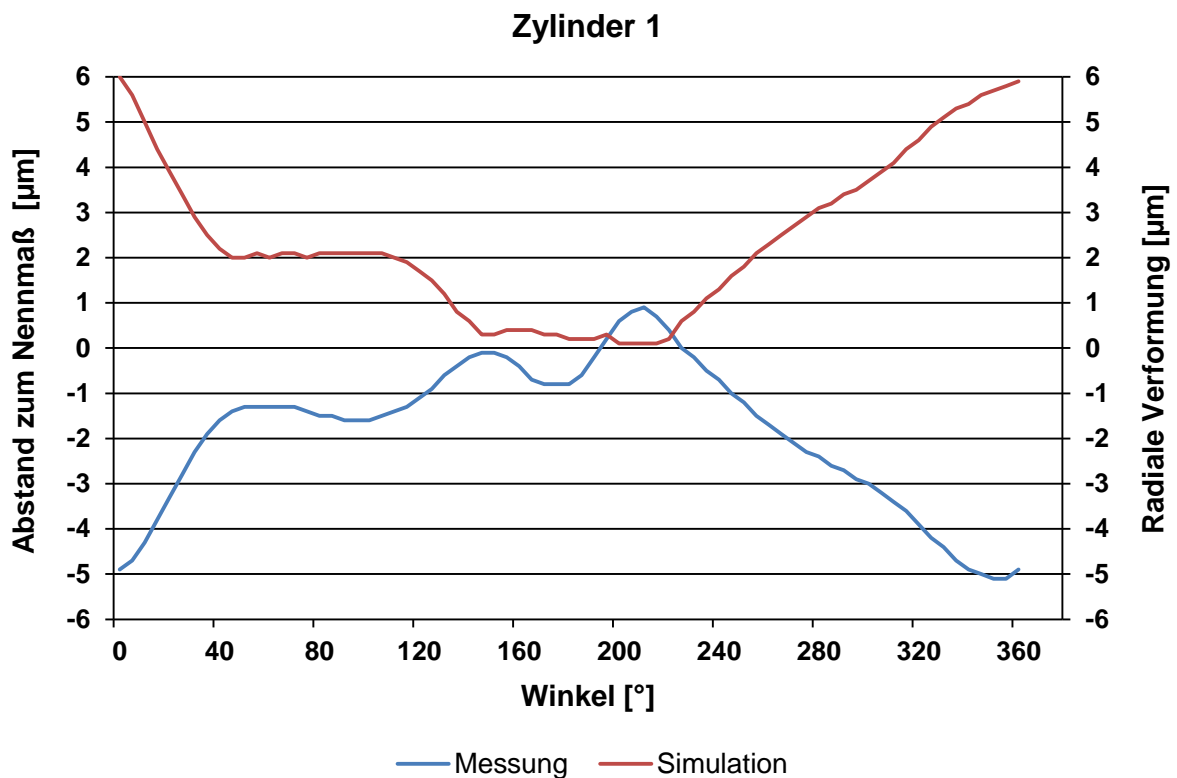


Bild 5.10: Gegenüberstellung von Messung und Simulation, Zylinder 1

Ein negativer Abstand zum Nennmaß bedeutet, dass an dieser Stelle weniger Material abgetragen wurde, da der Zylinder während der Bearbeitung an den labilen Stellen verformt wird und anschließend wieder in die Ausgangslage zurückfedert. Ein positiver Wert hingegen bedeutet, dass an dieser Stelle mehr Material abgetragen wurde und der Radius somit größer ist.

Am Winkel  $0^\circ/360^\circ$  ist der negative Abstand zum Nennmaß am höchsten und damit der Radius des Zylinders an dieser Stelle am geringsten. Die berechneten Verformungen nehmen an dieser Position ( $0^\circ/360^\circ$ ) ebenfalls den höchsten Wert an. Nähern

sich die Messwerte dem Nennmaß an, so sind auch geringere Verformungen zu beobachten (Position 180°). Aus der Wandstärkenanalyse des Kurbelgehäuses ist ersichtlich (Bild 5.11), dass an der Position 0° ein Bereich geringer Wandstärke vorliegt (ca. 1,2 mm geringer). Die Folge sind höhere Verformungen an dieser Stelle.

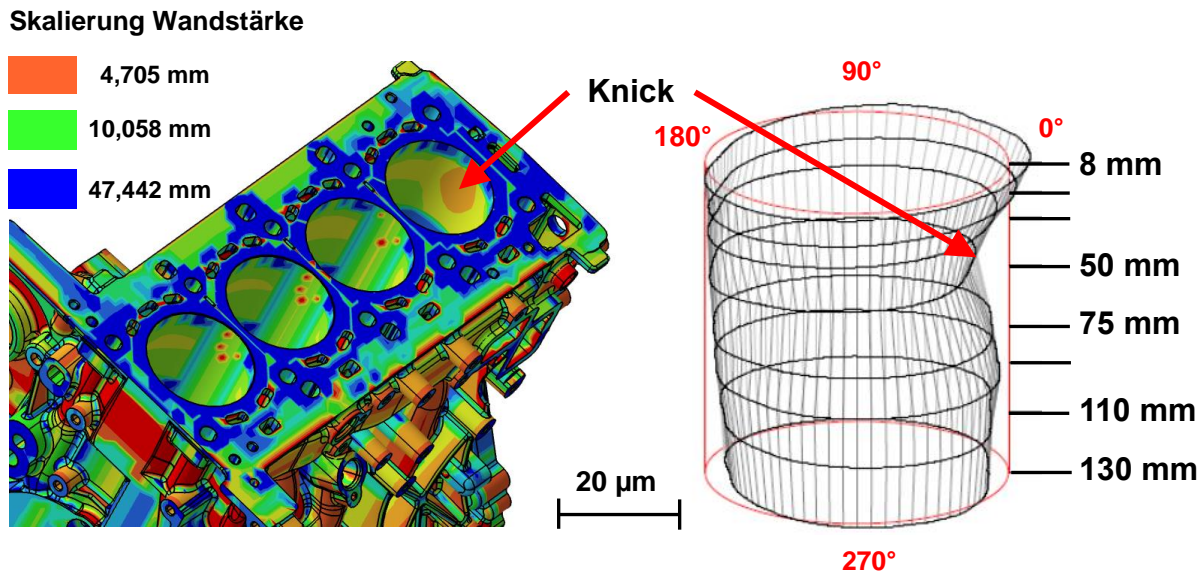


Bild 5.11: Wandstärkenanalyse und Formmessung, Zylinder 1

Bild 5.12 zeigt die Ergebnisse für die Zylinder 2 und 3. Es ist zu erkennen, dass in beiden Zylindern jeweils bei 90° und 270° höhere Verformungen und hohe negative Abstände zum Nennmaß vorliegen. In den Bereichen (135° bis 220°), in denen die Verformungen relativ gering ausfallen, sind die Abstände zum Nennmaß positiv. Dies deutet auf steifere Bereiche im Kurbelgehäuse hin, hier wurde wenig verformt und damit mehr Material zerspannt. Die Folge ist ein größerer Radius.

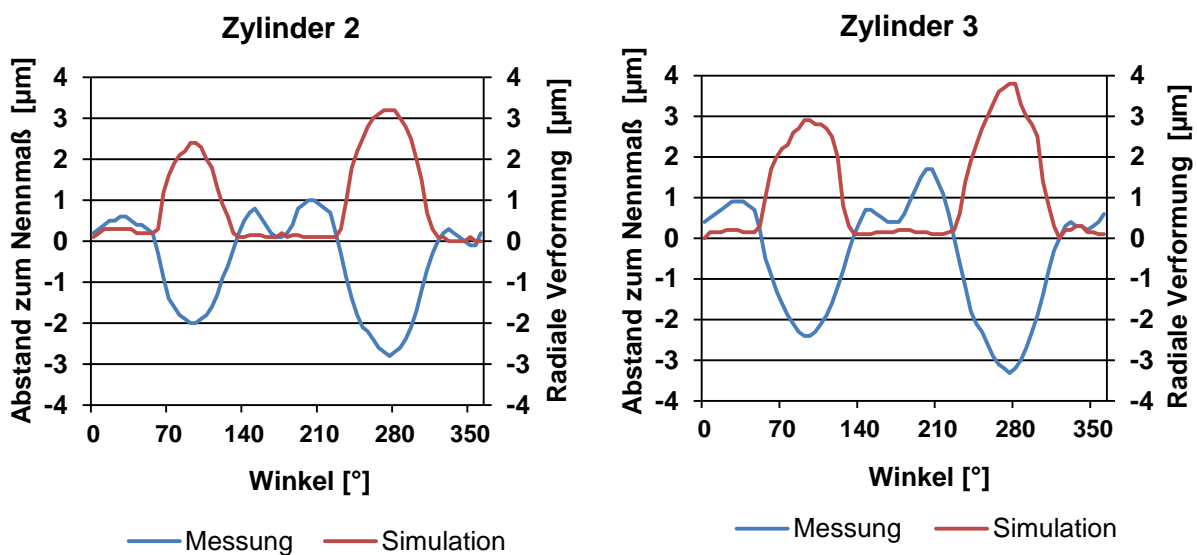


Bild 5.12: Gegenüberstellung von Messung und Simulation, Zylinder 2 und 3

Die Wandstärkenanalyse (Bild 5.13) von Zylinder 2 und 3 zeigt deutlich die geringe Wandstärke im Bereich 270°. Die gegenüberliegende Position bei 90° ist ähnlich ausgeprägt.

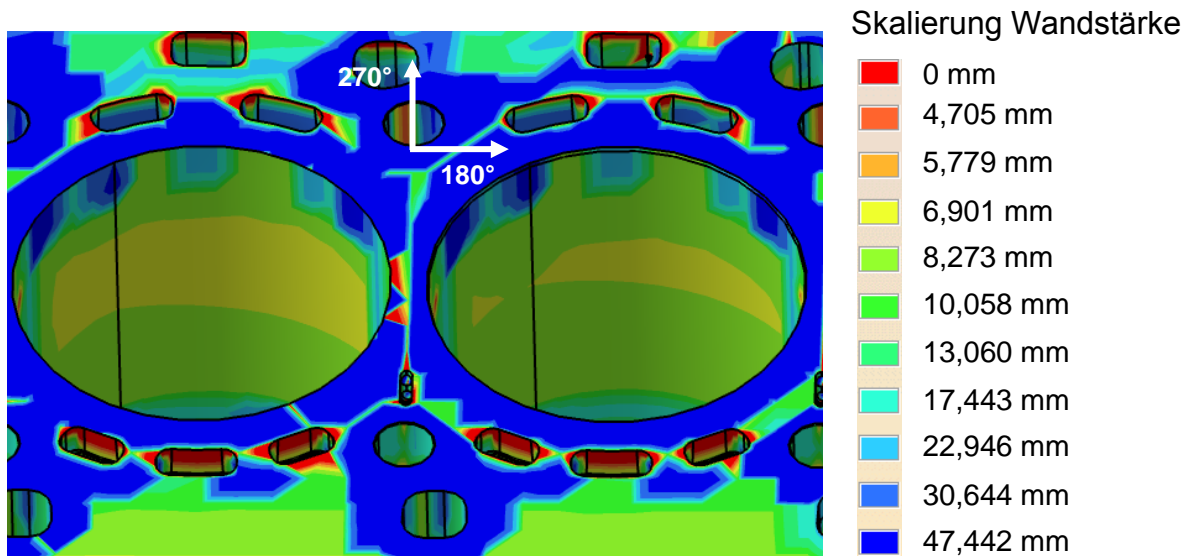


Bild 5.13: Wandstärkenanalyse Zylinder 2 und 3

Aus der Auswertung für Zylinder 4 geht hervor, dass im Bereich 180° hohe Verformungen vorliegen, die auf einen labilen dünnwandigen Bereich hindeuten, siehe Bild 5.14.

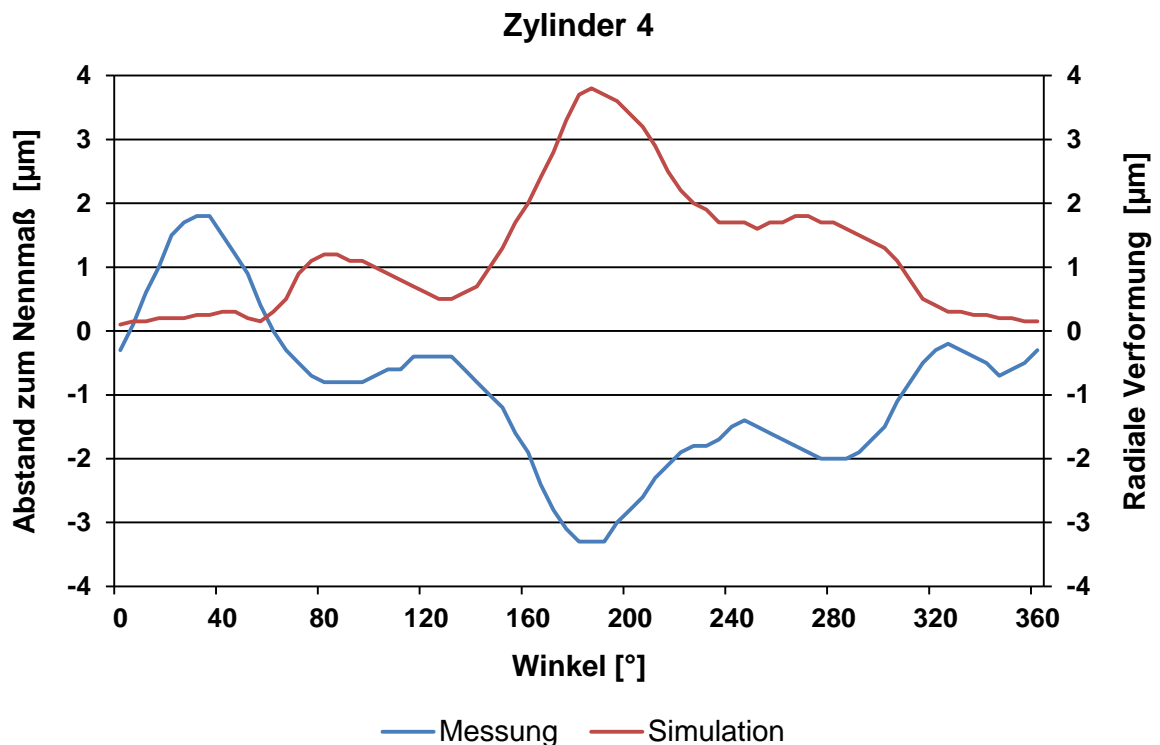


Bild 5.14: Gegenüberstellung von Messung und Simulation, Zylinder 4

Durch die Wandstärkenanalyse lassen sich diese Verformungen erklären. Es liegen hier ähnliche Verhältnisse vor wie in Zylinder 1, der labile Bereich liegt hier allerdings bei 180° und ist auch an der Mantellinie der Formmessung zu erkennen, siehe Bild 5.15.

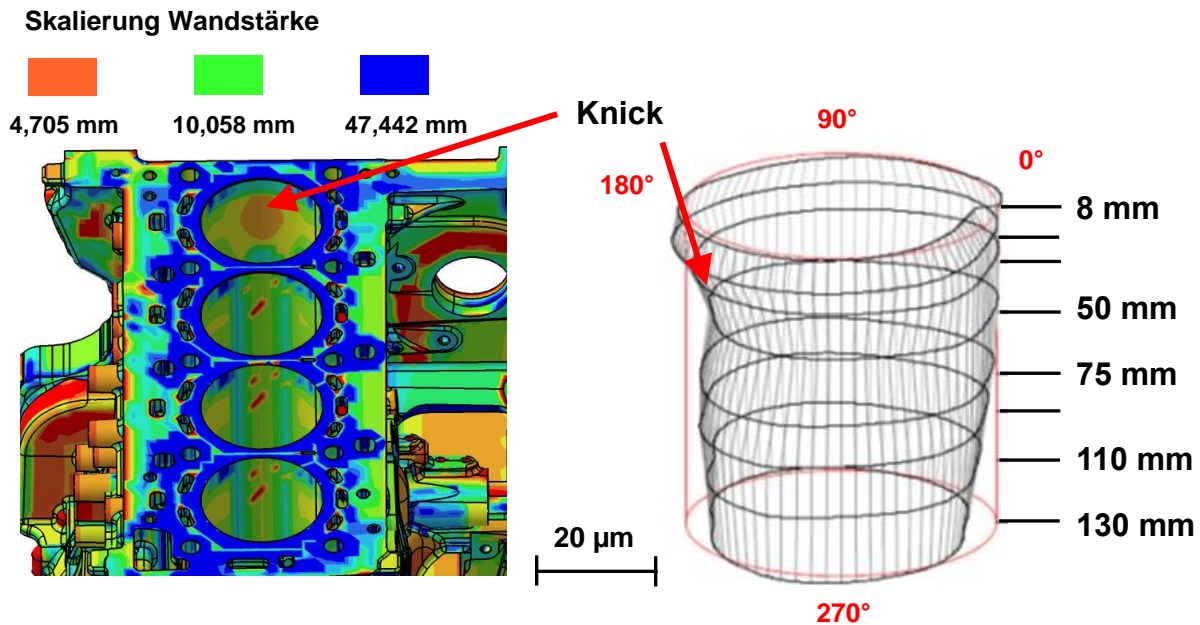


Bild 5.15: Wandstärkenanalyse und Formmessung, Zylinder 4

## 5.5 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Zylinderverformungen durch Bearbeitungskräfte mit Hilfe der Methode der finiten Elemente berechnet. Ausgehend von einem Werkzeugmodell werden die an der Bearbeitungsstelle wirkenden Kräfte berechnet. Diese stellen eine Eingangsgröße in das Berechnungsmodell dar. Die Berechnungen wurden an einem 4-Zylinder-Dieselmotor durchgeführt. Es wurde eine kritische Ebene gewählt, in der die höchsten Rundheitsabweichungen vorliegen.

Die Berechnungsergebnisse zeigen einen deutlichen Zusammenhang zwischen Verformung, Wandstärke und Formmessung. Höhere Verformungen sind jeweils an Stellen mit geringerer Steifigkeit zu beobachten. Der Zylinder wird während der Honbearbeitung elastisch verformt. Die Verformung hat einen geringeren Materialabtrag zur Folge. Nach dem Zurückfedern in die Ausgangslage ergibt sich ein geringerer Radius an der labilen Stelle (negativer Abstand zum Nennmaß). In den Bereichen höherer Steifigkeit/Wandstärke fallen die Verformungen geringer aus, ebenso der

Rückfedereffekt. An diesen Stellen wird dementsprechend mehr Material zerspant und es ergibt sich ein größerer Radius.

Mit der hier erarbeiteten Methodik, bestehend aus Werkzeug- und Simulationsmodell inklusive Wandstärkenanalyse, können für zukünftige Motorengenerationen kritische Stellen/Bereiche im Kurbelgehäuse schon früh in der digitalen Entwicklungsphase identifiziert werden. Auf Basis der Berechnungsergebnisse können konstruktive Maßnahmen eingeleitet werden, um das Kurbelgehäuse zu versteifen und damit die Verformungen und Rundheitsabweichungen zu reduzieren. Im Hinblick auf die Prozessgestaltung können Grenzen für Bearbeitungskräfte bzw. Zustellgeschwindigkeiten definiert werden, um die Qualitätsanforderungen zu erfüllen. Darauf basierend kann eine Abschätzung über die resultierenden Bearbeitungszeiten erfolgen, die bei der Investitionsplanung einer neuen Fertigungslinie herangezogen werden können, um die Anzahl erforderlicher Maschinen festzulegen. Ebenso können die Ergebnisse genutzt werden, um die Honsteinspezifikation zu optimieren. Es können Honsteine dahingehend qualifiziert werden, dass der erforderliche Abtrag auf entsprechenden Kraftniveaus realisiert wird, um die Verformungen zu reduzieren.

## 6 Modellbildung für Schneidstoff Diamant

Wie bereits erläutert, nehmen die Bearbeitungskräfte (Normalkraft, Tangentialkraft und Axialkraft) bei der Honbearbeitung eine zentrale Rolle ein. Die Kenntnis über die wirkenden Kräfte während der Honbearbeitung ermöglicht es zum einen, Honprozesse auf unterschiedlichen Maschinen mit unterschiedlicher Parametrierung zu beurteilen, zum anderen können die ermittelten Bearbeitungskräfte herangezogen werden, um eine Modellbildung des Honprozesses zu ermöglichen [Karp16].

### 6.1 Erfassung und Kalibrierung von Bearbeitungskräften

Mit der bei den Bearbeitungsversuchen eingesetzten Honmaschine Nagel VARIOHONE können sämtliche Prozessdaten während der Bearbeitung aufgezeichnet werden, siehe Bild 6.1. Allerdings werden die jeweiligen Prozessgrößen nur als prozentuale Drehmomente des Antriebsmotors der entsprechenden Achse wiedergegeben. Diese sind jedoch zur Analyse des Honprozesses nur bedingt geeignet, da zur Beschreibung dieser Größen keine aussagekräftigen wissenschaftlichen Einheiten vorliegen.

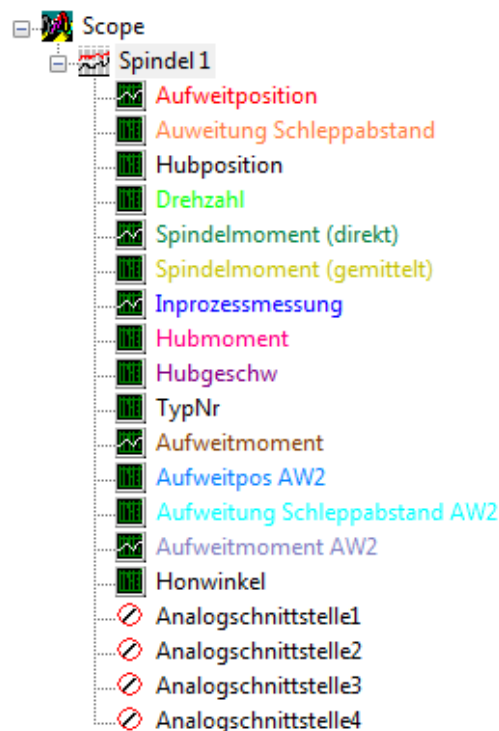


Bild 6.1: Auszug aus dem Programm zur Prozessdatensvisualisierung (ScopeView)

Im Folgenden werden die jeweiligen Prozessdaten der Maschine mit den entsprechenden Kraftkomponenten kalibriert, so dass zukünftig die steuerungsinternen kalibrierten Prozessdaten für Prozesskraftuntersuchungen und Prozessoptimierungen herangezogen werden können.

Die Versuche zur Kalibrierung der Prozessdaten werden mit einem weggesteuerten Fertighonprozess durchgeführt. Es kommt ein Diamanthonstein D35 mit folgender Parametrierung zum Einsatz:

- Drehzahl: 370 U/min
- Hubgeschwindigkeit: 20 m/min
- Zustellung: 2  $\mu\text{m/s}$
- Zerspanaufmaß: 25-30  $\mu\text{m}$

Ferner kommen die Vorrichtung und die Kraftmessplattform aus Kapitel 4.3.3 zur Anwendung. Über zwei analoge Schnittstellen an der Honmaschine können die Signale der Messplattform ( $M_z$  und  $F_z$ ) in das ScopeView der Nagel-Honmaschine eingespeist werden. So können die internen Maschinendaten und die Messplattform-Signale synchron sowie mit gleicher Abtastrate aufgezeichnet und bei ermittelter Korrelation eine Kalibrierung durchgeführt werden. Die Kalibrierung der Normalkraft wurde bereits in Kapitel 5.2 durchgeführt und eine entsprechende Korrelationskurve ermittelt, siehe Bild 5.5.

### 6.1.1 Kalibrierung der tangentialen Kraftkomponente $F_{ct}$

Das in Bild 6.2 dargestellte direkte Spindelmoment [%] (grün) deutet in seinem Verlauf auf eine Korrelation mit dem über die Messplattform in die Maschine eingespeisten Drehmoment  $M_z$  [Nm] (orange) hin. Bereich (1) zeigt das Anlaufmoment sowie das anschließend konstant verlaufende Leerlaufmoment. Bereich (2) gibt den Anstieg des Spindel- und Drehmoments während der Zerspanung wieder.

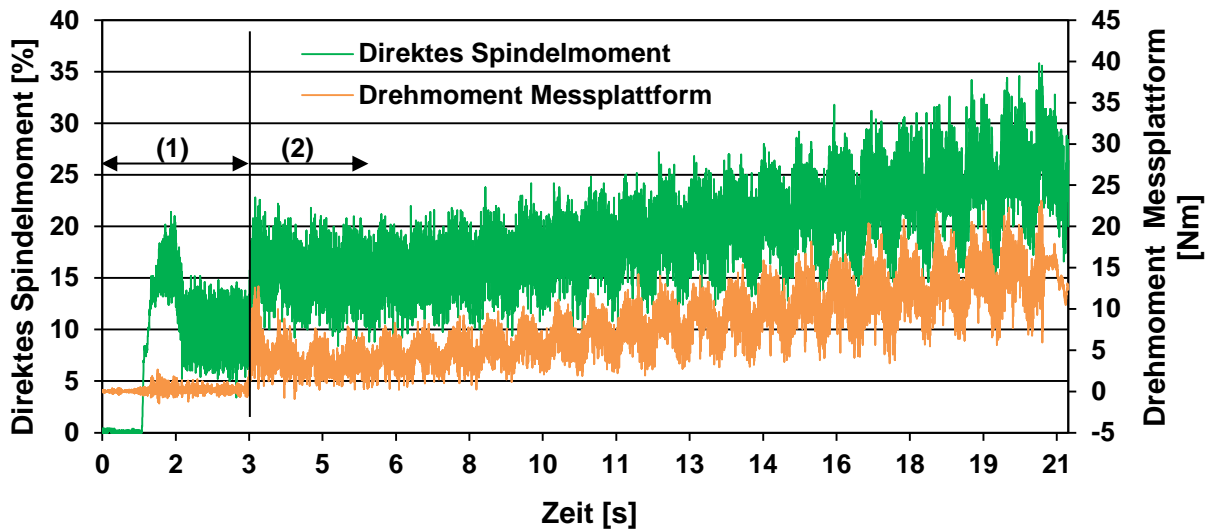


Bild 6.2: Verlauf Spindelmoment [%] und Drehmoment an der Messplattform [Nm]

Um eine Korrelation zwischen dem direkten Spindelmoment [%] und dem Drehmoment [Nm] nachzuweisen, wird bei der Auswertung eine Intervaldynamisierung (gleitender Durchschnitt von 20 Messwerten) durchgeführt, wodurch die Störeinflüsse reduziert und eine Glättung der Signale erreicht wird.

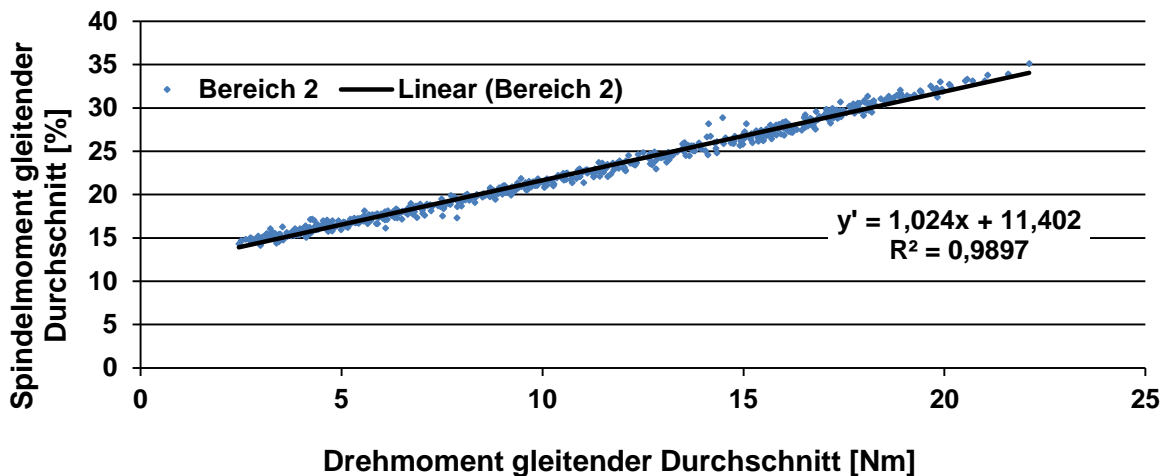


Bild 6.3: Korrelation direktes Spindelmoment [%] und Drehmoment [Nm]

Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  von 0,9897 in Bereich (2) weist auf einen starken linearen Zusammenhang beider Größen hin, siehe Bild 6.3. Der y-Achsenabschnitt der Regressionsgeraden in Bereich (2) zeigt, dass die Gerade nicht durch den Ursprung verläuft. Um die Werkzeugspindel in Bewegung zu versetzen, muss die Maschine ein Moment aufbringen, welches durch den y-Achsenabschnitt beschrieben wird und als sogenanntes Leerlaufmoment kontinuierlich während der



Rotationsbewegung anliegt. Somit gilt zwischen dem Drehmoment  $M_z$  [Nm] und dem prozentualen direkten Spindelmoment  $M_s$  [%] folgender Zusammenhang:

$$M_s[\%] = 1,024 \cdot M_z[\text{Nm}] + 11,402 \quad (6.1)$$

$$\text{Mit } M_z = F_{ct} \cdot d/2 \quad (6.2)$$

lässt sich der tangentielle Anteil der Schnittkraft  $F_{ct}$  wie folgt darstellen:

$$F_{ct} = \frac{2 \cdot (M_s - 11,402)}{1,024 \cdot d \cdot z} \quad (6.3)$$

mit:

z: Anzahl Honsteine

d: Werkstückdurchmesser

### 6.1.2 Kalibrierung der axialen Kraftkomponente $F_{ca}$

In Bild 6.4 ist die Axialkraft [N] (blau) und das Hubmoment [%] (rot) der Maschine dargestellt. In Bereich (1) findet keine Zerspanung statt, es ist allerdings ein konstant verlaufendes Hubmoment zu verzeichnen. Dieses Hubmoment resultiert aus der Auf- und Abwärtsbewegung der Spindel. In Bereich (2) schneiden die Honsteine die unbearbeitete Spritzschicht an und tragen die Rauigkeitsspitzen ab. Es ist ein leichter Anstieg der Axialkraft [N] zu erkennen. Das Hubmoment ändert sich nicht. In Bereich (3) findet die Zerspanung im Vollmaterial statt. Die Axialkraft steigt hier bis zu einem Maximum von ca. 1800 N an, wobei das Hubmoment sich nur geringfügig um maximal 5 % ändert.

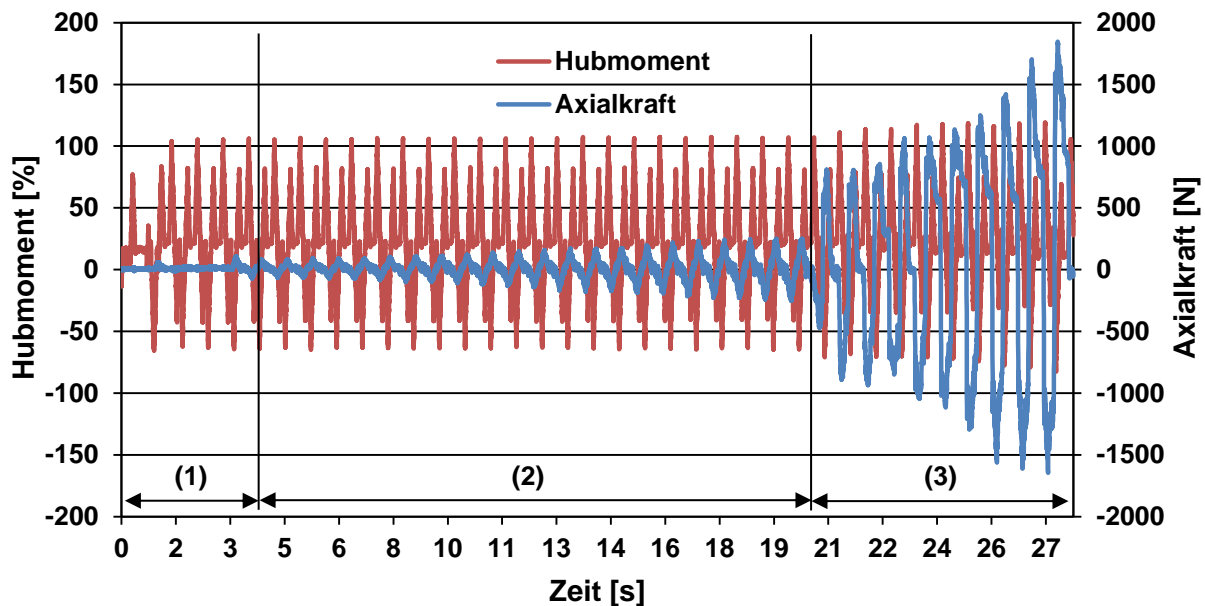


Bild 6.4: Verlauf Hubmoment [%] und Axialkraft an der Messplattform[N]

Es bleibt festzuhalten, dass eine Kalibrierung der Axialkraft über das Hubmoment nicht möglich ist, weil bereits für die Hubbewegung ohne Eingriff des Honsteins (Leerlauf) ein hohes Hubmoment erforderlich ist. Die Axialkraft ist im Verhältnis zum Hubmoment zu gering, als dass ein Anstieg der Axialkraft über das Hubmoment aufgelöst werden kann. In Kapitel 6.3.1 wird ein alternativer Ansatz zur Ermittlung der Axialkraft vorgestellt.

## 6.2 Versuche zur Ableitung von Regressionsmodellen

Im Rahmen der Versuchsdurchführung werden sowohl Maschinenparameter als auch die Honsteinspezifikation variiert, um die Einflüsse auf die Prozesskräfte und die Oberflächenrauigkeit zu erfassen. Bei den Maschinenparametern sind Tangentialgeschwindigkeit, Axialgeschwindigkeit sowie die Ist-Zustellung die variierenden Größen. Bei der Honsteinspezifikation werden die Kornkonzentration und der Füllstoffanteil (Kryolit) verändert, siehe Tabelle 6.1. Eine maximale Konzentration von 200 entspricht definitionsgemäß 50 Volumenprozent (Vol.-%) an Diamanten im Honstein. Durch den Füllstoffanteil in der Bindung soll das Schneidverhalten des Honsteins verbessert werden. Eine Variation der Korngröße wird nicht durchgeführt. Es handelt sich um ein Schneidkorn mit einer mittleren Korngröße von  $35 \mu\text{m}$  (D35). Ferner werden die Versuche mit dem Equipment aus Kapitel 6.1 durchgeführt, so dass auch die Axialkraft als Ausgangsgröße zur Verfügung steht.

Tabelle 6.1: Eingangsgrößen für die Versuchsreihen

<b>1. Maschinenparameter</b>	
Tangentialgeschw.	52-91-130 [m/min]
Axialgeschwindigkeit	10-20-30 [m/min]
Ist-Zustellung	1-3 [ $\mu\text{m/s}$ ]
<b>2. Honsteinspezifikation</b>	
Kornkonzentration	30-50-80 [-]
Füllstoffanteil	0-10-20 [Vol.-%]

Es wird ein teilfaktorieller Versuchsplan mit folgendem Zentralpunkt definiert:

- Tangentialgeschwindigkeit: 91 m/min
- Axialgeschwindigkeit: 20 m/min
- Ist-Zustellung: 2  $\mu\text{m/s}$
- Kornkonzentration: 50
- Füllstoffanteil: 10 %

Die Auswertung und Darstellung der Ergebnisgrößen wird mit dem Statistik-Tool Minitab durchgeführt.

### 6.3 Versuchsergebnisse

Zunächst wird ein alternativer Ansatz zur Bestimmung von  $F_{ca}$  aufgezeigt, mit der Zielsetzung, dass zukünftig Schnittkraftuntersuchungen ohne Kraftmessplattform durchgeführt werden können. Darüber hinaus werden die Auswirkungen der Variation der Maschinenparameter und der Honsteinspezifikation auf die Bearbeitungskräfte sowie die Oberflächenrauigkeit dargestellt. In Bild 6.5 wird erläutert, wie aus den während Bearbeitung aufgezeichneten Prozesskräften die charakteristischen Werte für die weitere Auswertung erfasst werden. Die Tangential- und Axialkraft betreffend wird der Bereich betrachtet, in dem der Honstein vollflächig an der Buchsenwand anliegt. Hier wirken die höchsten Kräfte. Die oberen und unteren Umkehrpunkte des Hubes sind durch  $F_a = 0 \text{ N}$  und einen Abfall von  $F_t$  zu erkennen. Die Rohdaten der Normalkraft  $F_n$  weisen ein hohes Rauschen auf, welches durch das elektromechanische Zustellsystem zum einen und den Selbstschärfeeffekt des Honsteins zum anderen zu erklären

sind. Hier wird ein gleitender Mittelwert für die bessere Beurteilung der Normalkraft verwendet.

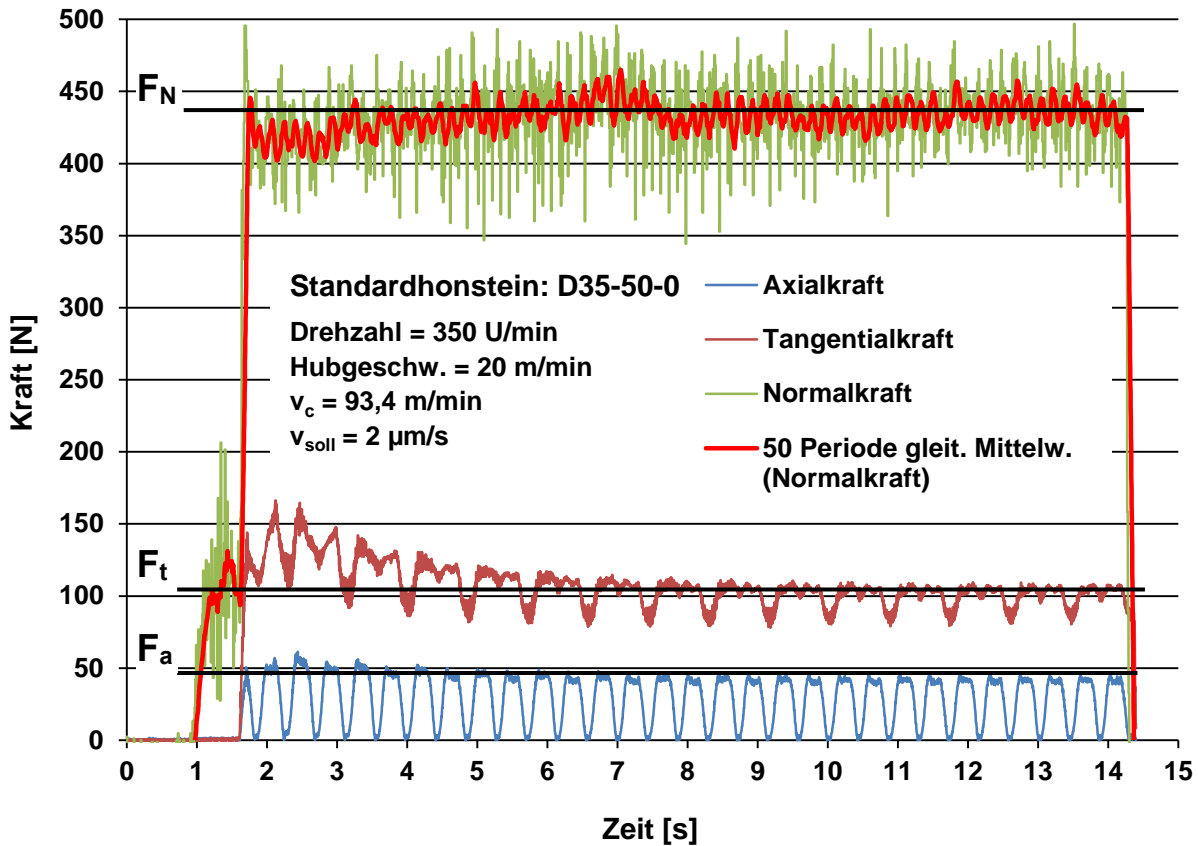


Bild 6.5: Prozesskräfte je Leiste während der Bearbeitung

Eine weitere wichtige Prozessgröße zur Bewertung des Honprozesses ist der Abtrag/Zustellung [ $\mu\text{m/s}$ ] während der Bearbeitung. Diese kann aus der Inprozessmessung berechnet werden, die zur Durchmessererfassung und Abschaltung des Prozesses notwendig ist. In Bild 6.6 sind die Aufweitposition ( $v_{soll}$ ) der Zustellachse [ $\mu\text{m/s}$ ] und die Inprozessmessung ( $v_{ist}$ ) [ $\mu\text{m/s}$ ] dargestellt. Die Unterscheidung zwischen  $v_{soll}$  und  $v_{ist}$  ist dahingehend von Bedeutung, da während der Versuche nicht durchgängig die vorgegebene Zustellung  $v_{soll}$  erreicht wurde und eine Falschinterpretation der Ergebnisse die Folge wäre. Ursache für die Abweichung zwischen  $v_{ist}$  und  $v_{soll}$  ist ein schlechtes Schneidverhalten des Honsteins trotz steigender Bearbeitungskraft. Es wird folglich nicht die vorgegebene Soll-Zustellung  $v_{soll}$  als Eingangsgröße verwendet, sondern der aus der Inprozessmessung abgeleitete Wert  $v_{ist}$ .

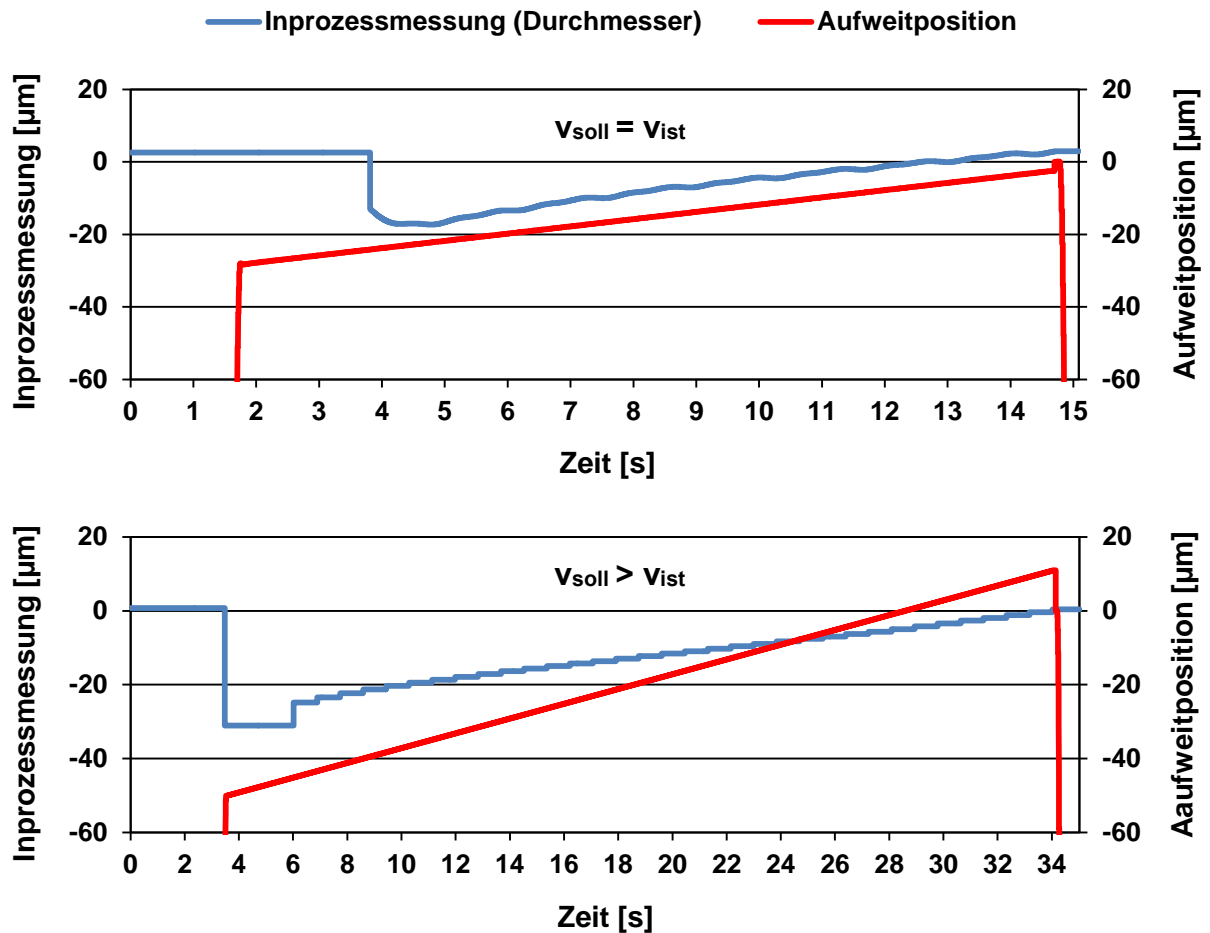


Bild 6.6: Gegenüberstellung von  $v_{\text{soll}}$  und  $v_{\text{ist}}$  [ $\mu\text{m}/\text{s}$ ]

### 6.3.1 Herleitung der Axialkraft über die Geschwindigkeitskomponenten

Aufgrund der Tatsache, dass eine Kalibrierung der Axialkraft  $F_{ca}$  über das Hubmoment nicht realisierbar ist (vgl. Kapitel 6.1.2), wird ein alternativer Ansatz gewählt. Das Ziel dieses Ansatzes ist es, einen Zusammenhang zwischen dem Kraftverhältnis  $F_{ca}/F_{ct}$  und dem Geschwindigkeitsverhältnis  $v_{ca}/v_{ct}$  herzustellen. In Bild 6.7 ist das Verhältnis  $F_{ca}/F_{ct}$  in Abhängigkeit von dem Verhältnis  $v_{ca}/v_{ct}$  für 5 unterschiedliche Honsteinspezifikationen dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den Quotienten vorliegt. Demzufolge ist  $F_{ca}/F_{ct}$  um den Faktor 1,2906 größer als  $v_{ca}/v_{ct}$ . Dies gilt für alle 5 Honsteinspezifikationen.

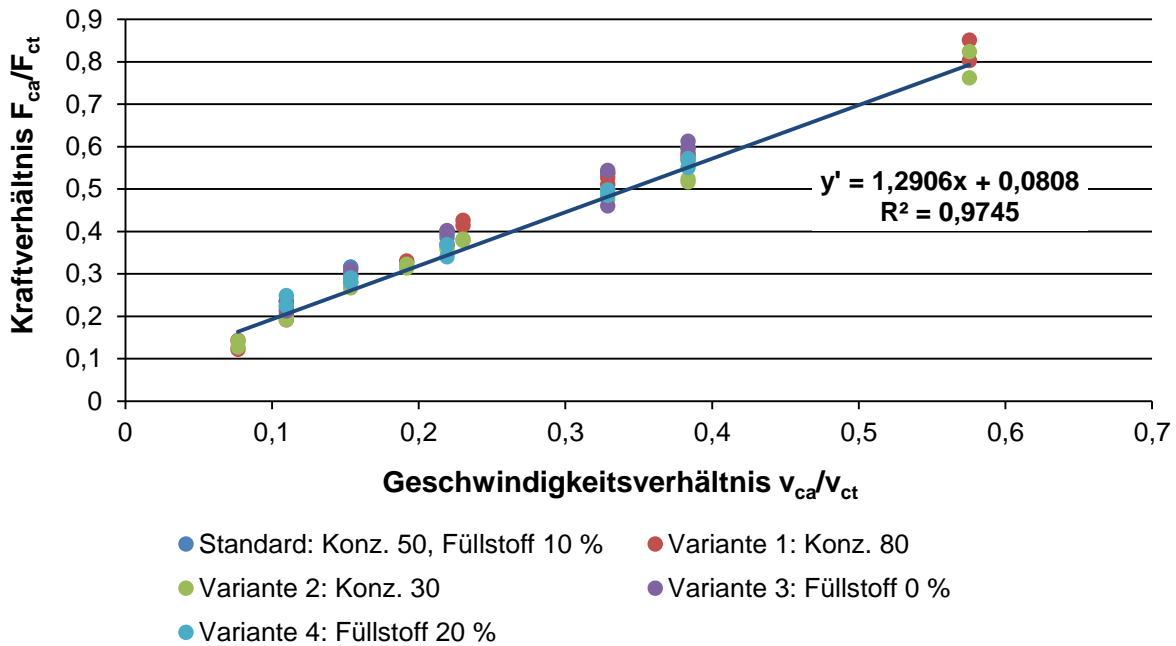


Bild 6.7: Korrelation zwischen Kraft- und Geschwindigkeitsverhältnissen unterschiedlicher Honsteine

Folglich kann die Axialkraft in guter Näherung über Formel 6.4 bestimmt werden.

$$F_{ca} = 1,291 \cdot \frac{v_{ca}}{v_{ct}} \cdot F_{ct} \quad (6.4)$$

$v_{ct}$  resultiert aus der Drehzahl,  $v_{ca}$  entspricht der Hubgeschwindigkeit und  $F_{ct}$  kann über das kalibrierte direkte Spindelmoment ermittelt werden.

### 6.3.2 Ergebnisse für Normalkraft $F_{cn}$

Tabelle 6.2 zeigt das Ergebnis der statistischen Analyse für die Zielgröße Normalkraft.

Tabelle 6.2: Auszug aus dem Minitab-Ergebnisprotokoll für Normalkraft

R-Qd(kor)=93,68 %

	p-Wert		p-Wert
<b>Linear</b>	0,000	<b>2-Faktor-Wechselwirkung</b>	0,001
Bindung	0,106	Bindung*Tangentialgeschwindigkeit	0,869
Füllstoff	0,000	Bindung*Axialgeschwindigkeit	0,651
Konzentration	0,000	Bindung*Zustellung_ist	0,541
Tangentialgeschwindigkeit	0,000	Füllstoff*Tangentialgeschwindigkeit	0,000
Axialgeschwindigkeit	0,122	Füllstoff*Axialgeschwindigkeit	0,884
Zustellung_ist	0,000	Füllstoff*Zustellung_ist	0,067
<b>Quadratisch</b>	0,000	Konzentration*Tangentialgeschwindigkeit	0,011
Bindung*Bindung	0,035	Konzentration*Axialgeschwindigkeit	0,018
Füllstoff*Füllstoff	0,000	Konzentration*Zustellung_ist	0,057
Konzentration*Konzentration	0,000	Tangentialgeschwindigkeit*Axialgeschwindigkeit	0,183
Tangentialgeschwindigkeit*Tangentialgeschwindigkeit	0,086	Tangentialgeschwindigkeit*Zustellung_ist	0,134
Axialgeschwindigkeit*Axialgeschwindigkeit	0,526	Axialgeschwindigkeit*Zustellung_ist	0,604
Zustellung_ist*Zustellung_ist	0,320		

In der statistischen Analyse sind sämtliche Wechselwirkungen sowie quadratische Einflüsse enthalten. Nach Entfernung der nicht signifikanten Terme ( $p$ -Wert  $> 0,05$ ) ergibt sich für die Normalkraft folgendes reduziertes Modell mit einer Erklärungsrate von 81,17 %, siehe Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Normalkraft

#### Zusammenfassung des Modells

**R-Qd(kor)=81,17 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Füllstoff	0,000
Konzentration	0,002
Tangentialgeschwindigkeit	0,000
Axialgeschwindigkeit	0,047
Zustellung_ist	0,000
Füllstoff*Füllstoff	0,000
Tangentialgeschwindigkeit*Tangentialgeschwindigkeit	0,001

#### Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten

$$\begin{aligned} \text{Normalkraft} = & 304,9 + 0,13 \cdot \text{Füllstoff} + 0,704 \cdot \text{Konzentration} \\ & + 1,045 \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \\ & - 1,082 \cdot \text{Axialgeschwindigkeit} + 82,40 \cdot \text{Zustellung\_ist} \\ & - 0,3508 \cdot \text{Füllstoff} \cdot \text{Füllstoff} \\ & - 0,01465 \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \end{aligned}$$

In Bild 6.8 ist das Haupteffektdiagramm für die Normalkraft dargestellt.

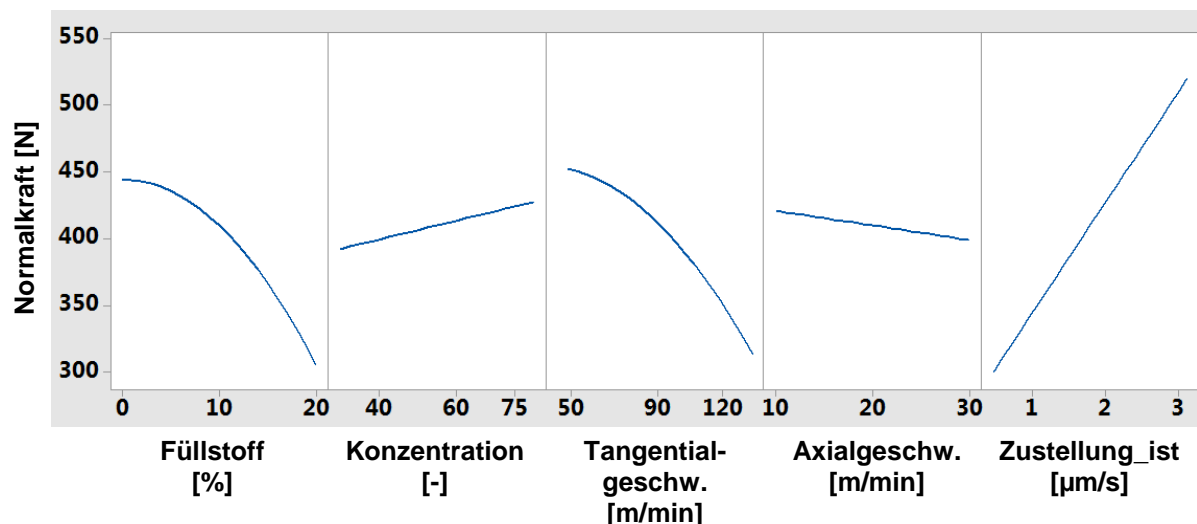


Bild 6.8: Haupteffektdiagramm für Normalkraft

Es ist ersichtlich, dass niedrige Normalkräfte durch hohe Tangentialgeschwindigkeiten sowie niedrigere Zustellungen erreicht werden. Für die geringere Eindringtiefe der

Schneidkörner bei hohen Tangentialgeschwindigkeiten (Drehzahlen) sind geringere Normalkräfte erforderlich. Durch einen höheren Füllstoffanteil wird auch die Normalkraft reduziert, da der Honstein durch die „geschwächte“ Bindung eine bessere Selbstschärfung erfährt und damit den Abtrag bei geringeren Kräften realisieren kann. Niedrige Normalkräfte sind bei der Honbearbeitung anzustreben, um die Formabweichung durch elastische Deformation des Kurbelgehäuses zu reduzieren. Höhere Kornkonzentrationen führen zu einem Anstieg der Normalkraft, weil sich diese auf eine höhere Anzahl Schneidkörner verteilt. Um den erforderlichen Abtrag zu erreichen, ist folglich eine höhere Kraft erforderlich. Durch höhere Axialgeschwindigkeiten kann die Normalkraft nur geringfügig verringert werden.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge sind in Bild 6.9 zwei Wirkungsflächendiagramme für die Normalkraft dargestellt.

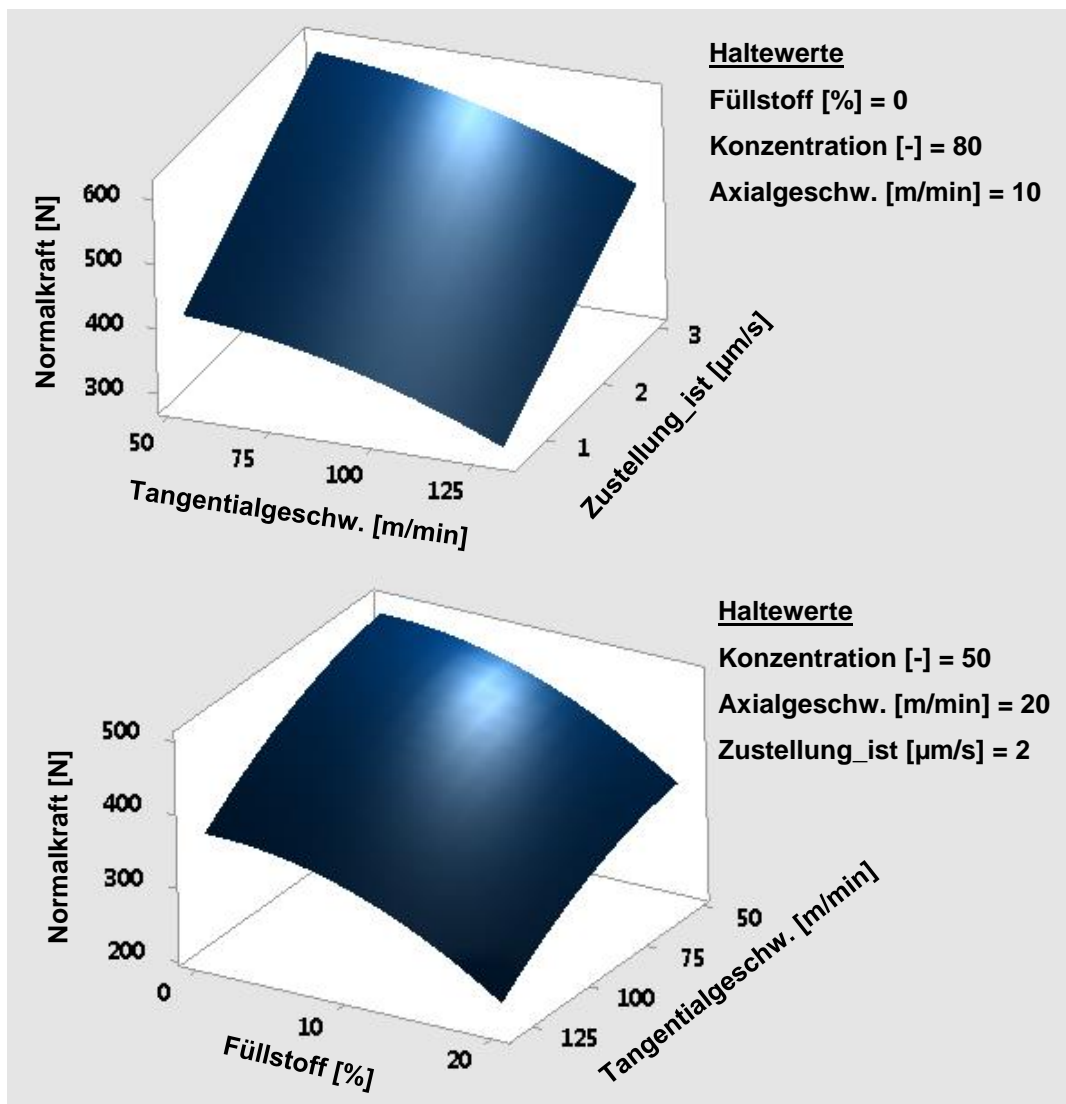


Bild 6.9: Wirkungsflächendiagramme für die Normalkraft



Abschließend werden die Residuen des Modells überprüft, um systematische Fehler im Modell zu identifizieren, siehe Bild 6.10.

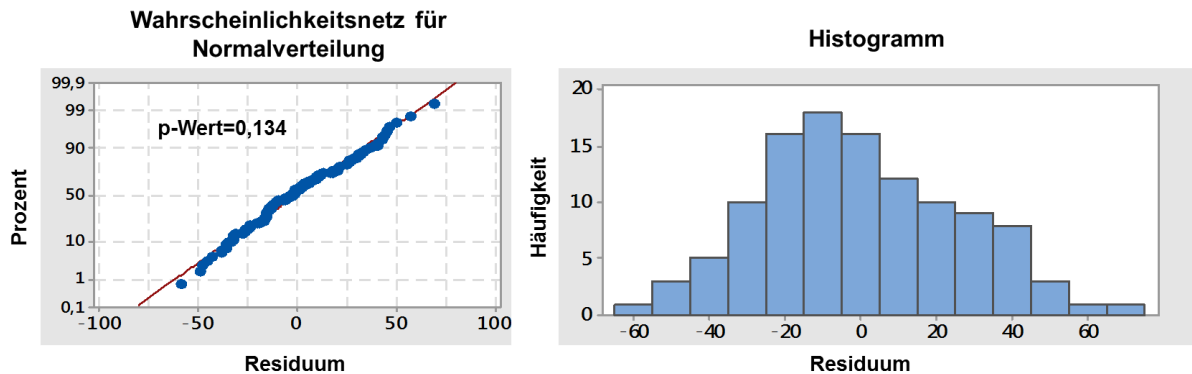


Bild 6.10: Residuendiagramme des Modells

Die Analyse der Residuen zeigt, dass diese normalverteilt sind ( $p\text{-Wert} > 0,05$ ). Somit liegt ein aussagekräftiges Modell für die Normalkraft vor. Im Folgenden wird auf die Darstellung der Residuen verzichtet, sofern keine Auffälligkeiten auftreten.

### 6.3.3 Ergebnisse für Axialkraft $F_{ca}$

Die Axialkraft wird bei diesen Versuchsreihen über die Kraftmessplattform ermittelt, so dass der Ansatz aus Kapitel 6.3.1 an dieser Stelle nicht angewandt wird. Tabelle 6.4 kann das reduzierte Modell sowie die Regressionsgleichung für die Axialkraft entnommen werden. Es liegt eine Erklärungsrate von 84,40 % vor.

Tabelle 6.4: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Axialkraft

#### Zusammenfassung des Modells

**R-Qd(kor)=84,40 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Füllstoff	0,000
Tangentialgeschwindigkeit	0,000
Axialgeschwindigkeit	0,000
Zustellung_ist	0,000
Tangentialgeschwindigkeit*Tangentialgeschwindigkeit	0,000

#### Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten

$$\begin{aligned} \text{Axialkraft} = & 91,88 - 0,643 \cdot \text{Füllstoff} \\ & - 1,454 \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \\ & + 1,465 \cdot \text{Axialgeschwindigkeit} \\ & + 13,30 \cdot \text{Zustellung\_ist} \\ & + 0,004425 \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \end{aligned}$$

In Bild 6.11 sind die Einflüsse der einzelnen Faktoren auf die Axialkraft in einem Haupteffektdiagramm zusammengefasst.

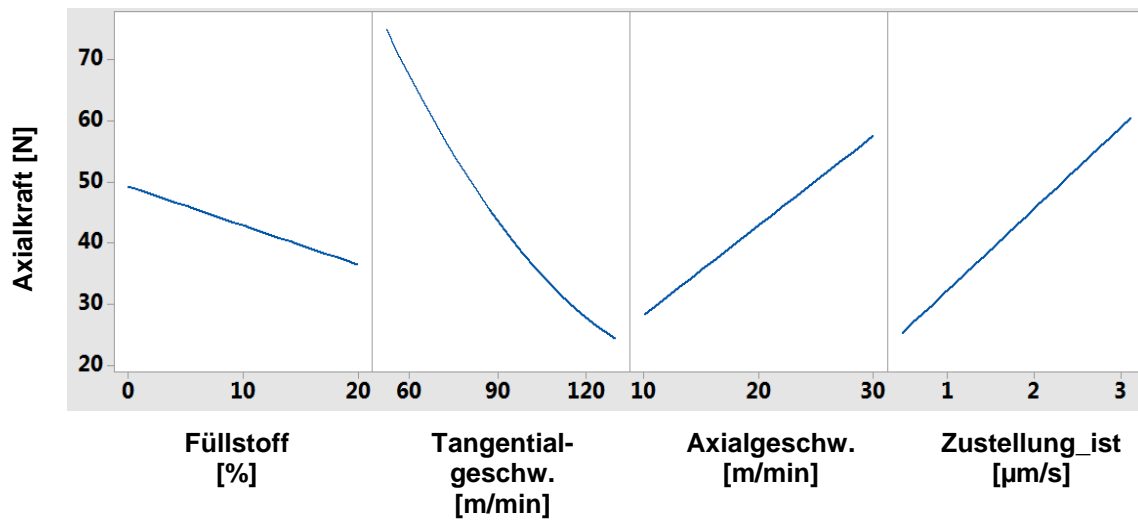


Bild 6.11: Haupteffektdiagramm für die Axialkraft

Es ist erkennbar, dass niedrige Tangentialgeschwindigkeiten, hohe Zustellungen sowie hohe Axialgeschwindigkeiten zu hohen Axialkräften führen. Die Variation der Honsteinspezifikation hat nur in geringem Maße Einfluss auf die Axialkraft. Der Honstein ohne Füllstoff weist im Vergleich zum Honstein mit 20% Füllstoffanteil geringfügig höhere Axialkräfte auf. Bei dem Honstein ohne Füllstoff findet aufgrund der fehlenden Spanräume ein „Zuschmieren“ des Honsteins statt. Dabei wird die Schneidfähigkeit des Honsteins beeinflusst, was zu einem Anstieg der Axialkraft führt, siehe auch Bild 6.12. Ein Einfluss der Konzentration auf die Axialkraft konnte nicht konstatiert werden ( $p$ -Wert  $> 0,05$ ).

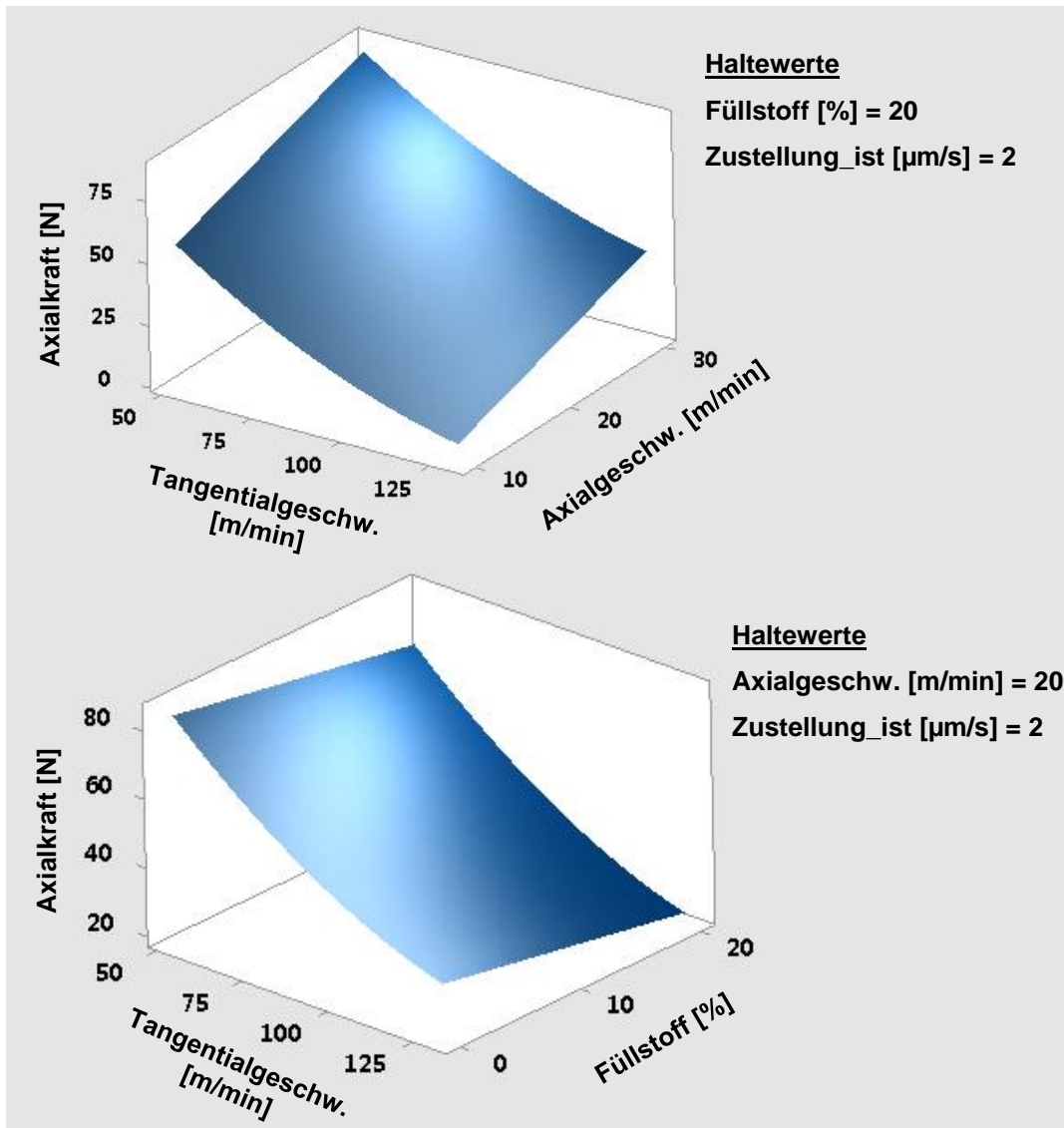


Bild 6.12: Wirkungsflächendiagramme für die Axialkraft

### 6.3.4 Ergebnisse für Tangentialkraft $F_{ct}$

In Tabelle 6.5 ist das reduzierte Modell sowie die Regressionsgleichung für die Tangentialkraft dargestellt. Die Erklärungsrate liegt bei 77,26 %.

Tabelle 6.5: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Tangentialkraft

**Zusammenfassung des Modells****R-Qd(kor)=77,26 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Füllstoff	0,000
Tangentialgeschwindigkeit	0,000
Zustellung_ist	0,000

**Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten**

Tangentialkraft = 133,86 - 1,334\*Füllstoff  
 - 0,6989\*Tangentialgeschwindigkeit  
 + 30,12\*Zustellung\_ist

Aus dem Haupteffektdiagramm in Bild 6.13 geht hervor, dass durch eine Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit die Tangentialkraft reduziert wird. Durch die höhere Schnittgeschwindigkeit dringen die Schneidkörner je Umdrehung weniger tief in die Oberfläche ein, woraus die niedrigeren Tangentialkräfte resultieren. Höhere Zustellungen dagegen führen zu höheren Tangentialkräften. Ein höherer Füllstoffanteil (20 %) reduziert das Bindungsvolumen und damit auch die Kontaktfläche zwischen Honstein und der Werkstückoberfläche. Die Folge sind niedrigere Tangentialkräfte, siehe auch Bild 6.14.

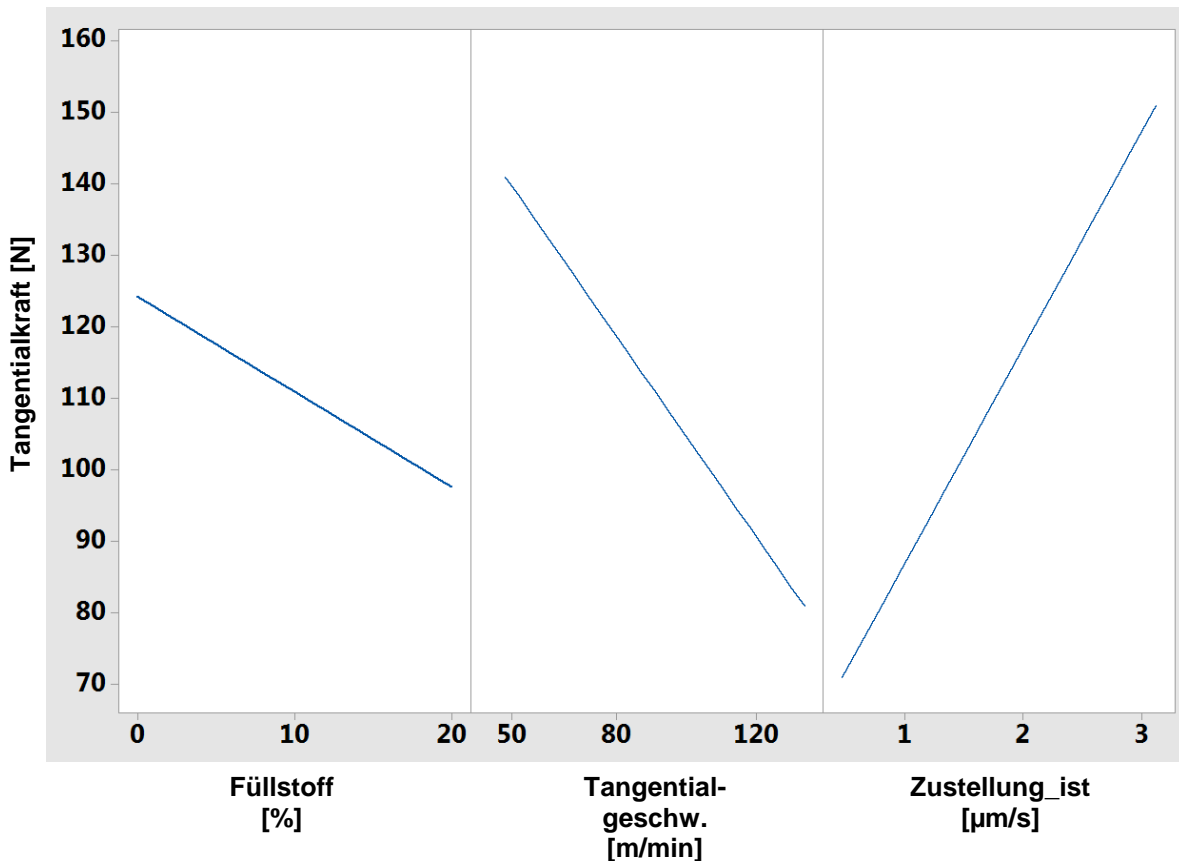


Bild 6.13: Haupteffektdiagramm für die Tangentialkraft

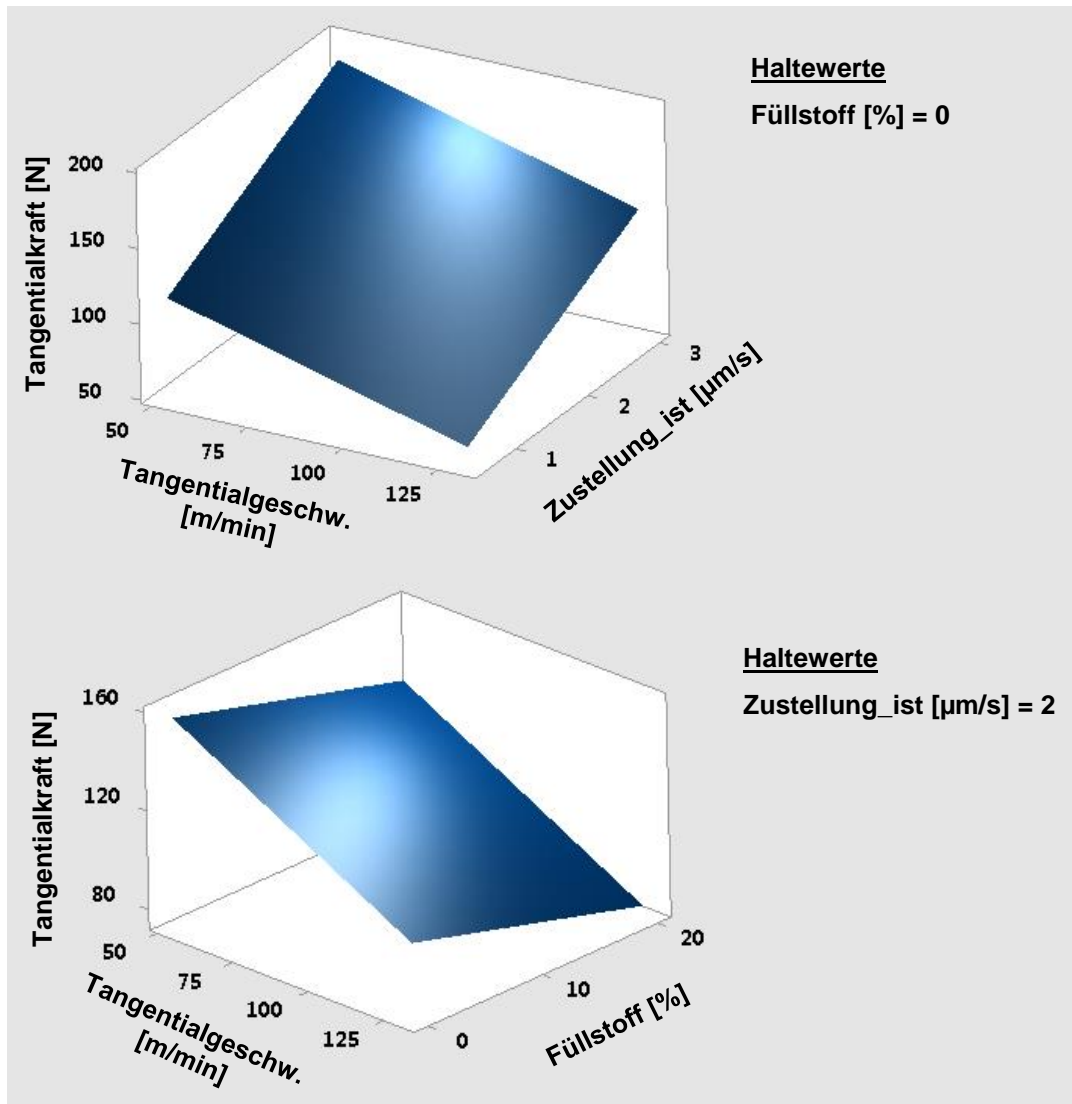


Bild 6.14: Wirkungsflächendiagramme für die Tangentialkraft

### 6.3.5 Ergebnisse für Oberflächenrauigkeit

Zusätzlich zur Analyse der Prozesskräfte werden die Einflüsse der Eingangsgrößen auf die Oberflächenrauigkeit (R6sB) betrachtet. Tabelle 6.6 kann das Regressionsergebnis entnommen werden. Die Erklärungsrate des Modells beträgt 68,69 %.

Tabelle 6.6: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Oberflächenrauigkeit

**Zusammenfassung des Modells****R-Qd(kor)=68,69 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Füllstoff	0,000
Konzentration	0,000
Tangentialgeschwindigkeit	0,034
Zustellung_ist	0,025

**Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten**

Rauigkeit = 2,976 + 0,01427\*Füllstoff - 0,01865\*Konzentration  
 - 0,001687\*Tangentialgeschwindigkeit + 0,0881\*Zustellung\_ist

In Bild 6.15 ist das Haupteffektdiagramm für die Oberflächenrauigkeit dargestellt.

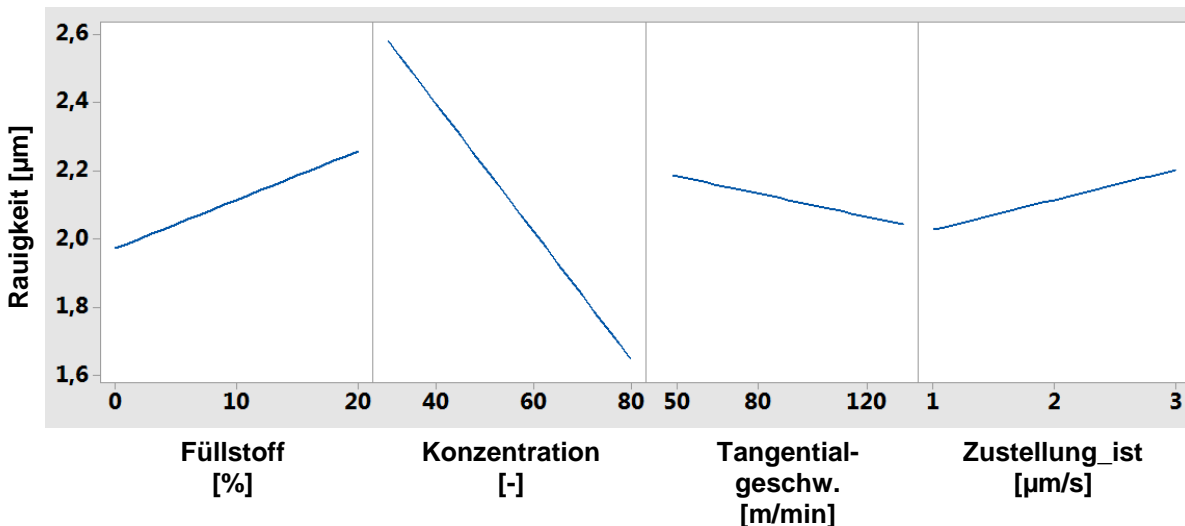


Bild 6.15: Haupteffektdiagramm für die Oberflächenrauigkeit

Aus dem Haupteffektdiagramm geht hervor, dass höhere Kornkonzentrationen die Rauigkeit der Oberfläche reduzieren. Wie in Kapitel 6.3.2 erläutert, wirken bei höheren Konzentrationen höhere Normalkräfte. Die Eindringtiefe der Schneidkörner ist allerdings geringer, weil mehr Schneidkörner am Zerspanprozess beteiligt sind. Der kleinere Spanungsquerschnitt erzeugt eine feinere Oberfläche. Bei geringen Kornkonzentrationen unterliegen die Schneidkörner einer höheren Belastung, so dass diese frühzeitig aus der Bindung gelöst werden. Es werden neue Schneidkörner von der Bindung freigegeben. Der Honstein ist schneidfreudiger, wodurch die Rauigkeit steigt. Ferner erzeugt der Honstein ohne Füllstoff eine feinere Oberfläche. Bei dieser Honsteinspezifikation liegt keine Schwächung der Bindung durch den Füllstoff vor.

Dadurch wird der Selbstschärfefekt gehemmt. Dies führt zu einer Glättung der Oberfläche durch einen schlecht schneidenden Prozess. Durch hohe Tangentialgeschwindigkeiten und niedrige Zustellungen kann die Oberflächenrauigkeit nur in geringem Maße reduziert werden, siehe auch Bild 6.16.

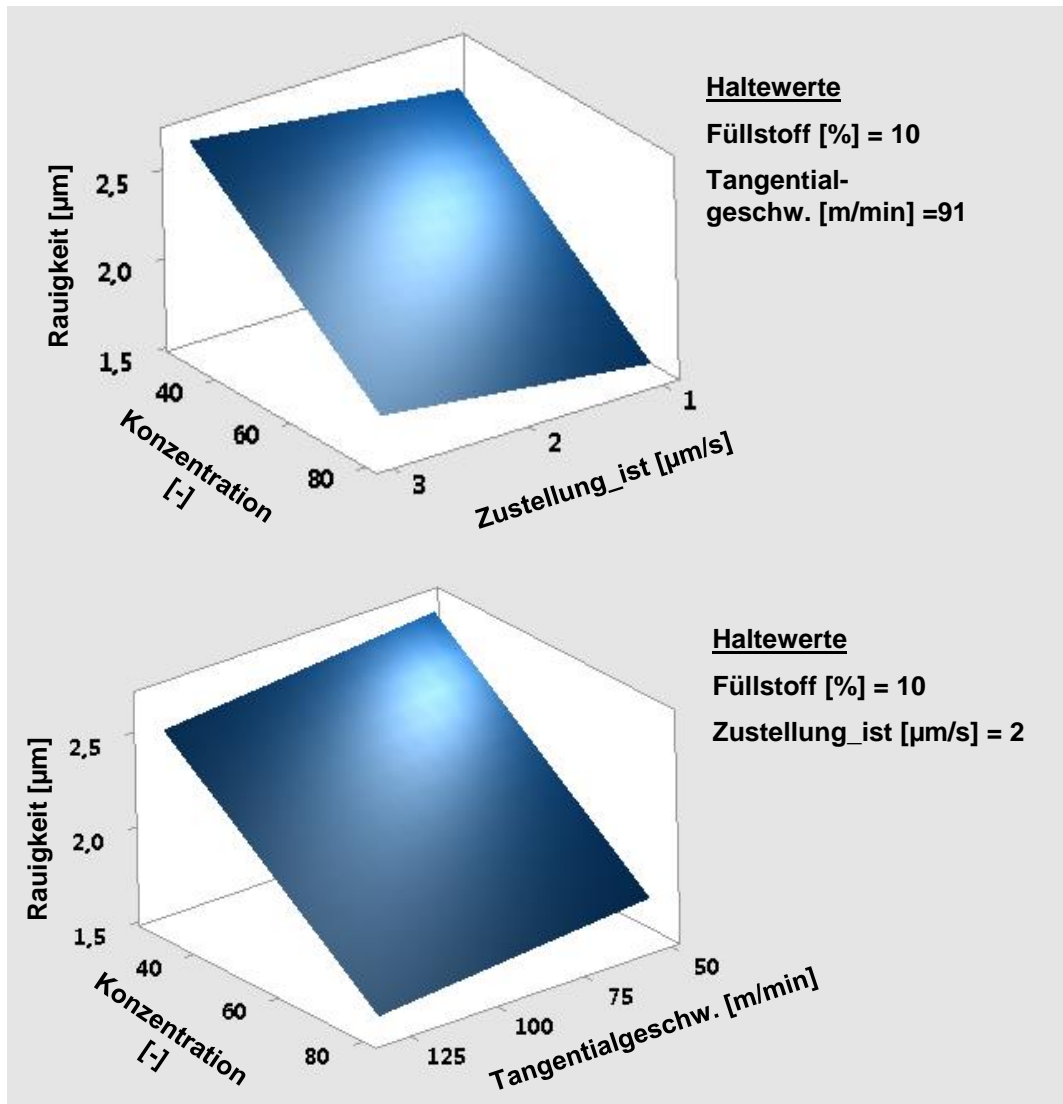


Bild 6.16: Wirkungsflächendiagramme für die Oberflächenrauigkeit

## 6.4 Fazit

In diesem Kapitel wurden die während der Honbearbeitung wirkenden Prozesskräfte (Axialkraft, Tangentialkraft und Normalkraft) mit Hilfe geeigneter Messtechniken erfasst und der Einfluss der Eingangsgrößen (Maschinenparameter und Schneidstoffzusammensetzung) auf die Ausgangsgrößen analysiert (Prozesskräfte und Oberflächenrauigkeit).

Hierbei wurden zunächst die jeweiligen Prozessdaten der Maschine mit den entsprechenden Kraftkomponenten kalibriert. Es konnte eine Korrelation zwischen dem direkten Spindelmoment und dem Drehmoment der Kraftmessplattform nachgewiesen werden. Über eine spezielle Vorrichtung konnte eine Kalibrierung der Normalkraft über das Aufweitmoment des Zustellmotors vorgenommen werden. Eine Kalibrierung der Axialkraft über das Hubmoment war nicht möglich, da bereits für die Hubbewegung ein hohes Moment erforderlich ist, so dass Änderungen der Axialkraft nicht erfasst werden können. Weiterhin konnte eine Korrelation zwischen dem Kraftverhältnis  $F_{ca}/F_{ct}$  und dem Geschwindigkeitsverhältnis  $v_{ca}/v_{ct}$  nachgewiesen werden, so dass die Axialkraft über die Tangentialkraft bestimmt werden kann. Somit können zukünftig alle Bearbeitungskräfte über die kalibrierten steuerungsinternen Daten erfasst werden.

Aus den ermittelten Regressionsmodellen geht hervor, dass höhere Tangentialgeschwindigkeiten (Drehzahlen) niedrigere Bearbeitungskräfte zur Folge haben. Bei der Variation der Schneidstoffspezifikation konnte festgestellt werden, dass durch einen höheren Füllstoffanteil die Bearbeitungskräfte ebenfalls reduziert werden. Dies ist vorteilhaft, da insbesondere höhere Normalkräfte zu Formabweichungen führen. Eine deutliche Herabsetzung der Oberflächenrauigkeit konnte nur durch eine hohe Kornkonzentration erreicht werden.

Die Korrelation der physikalischen Messgrößen (Bearbeitungskräfte) mit den internen Prozessdaten der Honmaschine (Drehmomente der Antriebsmotoren) bildet die Grundlage für die Entwicklung von Regelungsstrategien für Honprozesse. Beispielsweise kann die Prozessführung dahingehend optimiert werden, dass die Zustellgeschwindigkeiten bei Erreichung einer (simulativ) ermittelten Grenz-Normalkraft reduziert und dadurch Formabweichungen minimiert werden. Ferner können erweiterte Regelungsstrategien entwickelt werden, um eine vollständige Überprüfung der Zielgrößen (Abtrag, Oberflächenrauigkeit, Geometrie, Randzoneneigenschaften, tribologisches Verhalten) auf Basis der Bearbeitungskräfte zu ermöglichen.



## 7 Modellbildung für Schneidstoff Siliziumkarbid

In diesem Kapitel wird der Schneidstoff metallisch gebundener Diamant des Fertig/Glätthonprozesses aus qualitativen Gründen durch Siliziumkarbid mit keramischer Bindung (SiC) ersetzt und die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge des neuen Schneidstoffs analysiert, siehe Bild 7.1. Der Schneidstoff Siliziumkarbid kommt bei thermischen Spritzschichten bisher nicht zum Einsatz und stellt somit eine Neuentwicklung dar. Zielsetzung dieser Schneidstoffsubstitution ist eine höhere Oberflächengüte mit reduzierten Material-Aufschmierungen und verbesserter Porenöffnung. Durch die Endbearbeitung mit Siliziumkarbid konnte bereits bei Grauguss-oberflächen eine höhere Oberflächenqualität erzielt werden. Dabei konnte durch die verbesserte Schnittstruktur die charakteristische Blechmantelbildung reduziert werden.

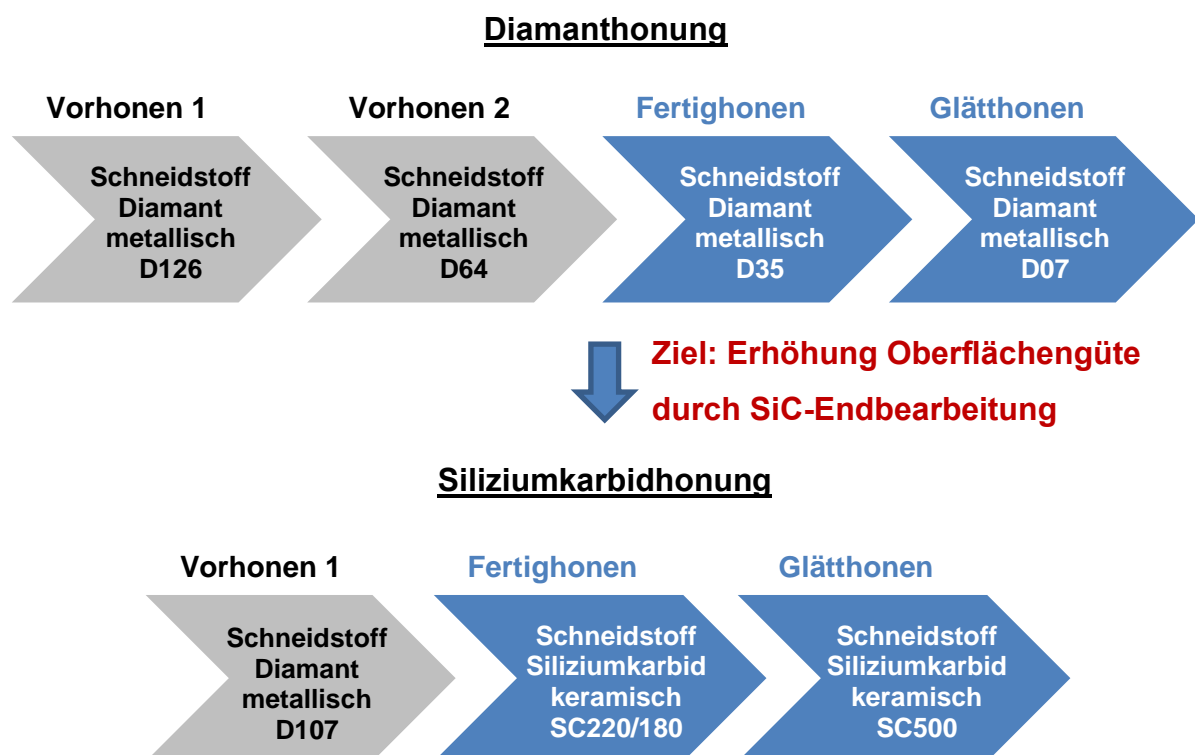


Bild 7.1: Übersicht Prozessketten

Bei den Versuchen wird der Fokus auf den vorletzten Prozessschritt Fertighonen gelegt. Die Prozessführung erfolgt hier weggesteuert mit Abschaltart Luftmessung. Daher ist dieser Prozessschritt in großem Maße von der Schneidfähigkeit des SiC-Honsteins abhängig und damit für einen stabilen Prozess mit konstantem Abtrag sowie geringer Maß- und Rauigkeitsstreuung essentiell. Der letzte Prozessschritt, das

Glätthonen, erfolgt kraftgesteuert mit Abschaltart Zeit und wird im nächsten Kapitel thematisiert. Der Vorhonprozess erfolgt weiterhin mit Diamant, jedoch mit einer größeren Körnung (D107) als bei der Diamanthonung (D64). Die Nagel-Honmaschine VARIOHONE steht bei diesen Versuchsreihen aufgrund hoher Auslastung bei der Prototypenfertigung nicht zur Verfügung. Folglich werden die Versuche an der Gehring Honmaschine Z400-125 durchgeführt. Hier steht ausschließlich die Normalkraft, die über die Steuerspannung des Zustellmotors kalibriert werden kann, als Prozessgröße zur Analyse des Honprozesses zur Verfügung.

## 7.1 Problematik der Hauptzeitstreuung im Fertighonprozess

Aus mehreren Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Honsteinspezifikationen geht hervor, dass beim weggesteuerten Fertighonen mit Siliziumkarbid eine hohe Hauptzeitstreuung ein Grundproblem darstellt. Auch eine Variation der Maschinenparameter (Tangentialgeschwindigkeit, Zustellung) konnte diese Streuung nicht verringern.

In Bild 7.2 ist exemplarisch der Verlauf der Hauptzeiten für den Fertighonstein SC220 über 6 KGH (24 Bohrungen) dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass eine hohe Streuung der Hauptzeiten vorliegt. Dies deutet auf einen instabilen Prozess hin, der insbesondere durch das aggressive Schneidverhalten (kurze Hauptzeit) Maß- und Oberflächenschwankungen zur Folge haben kann.

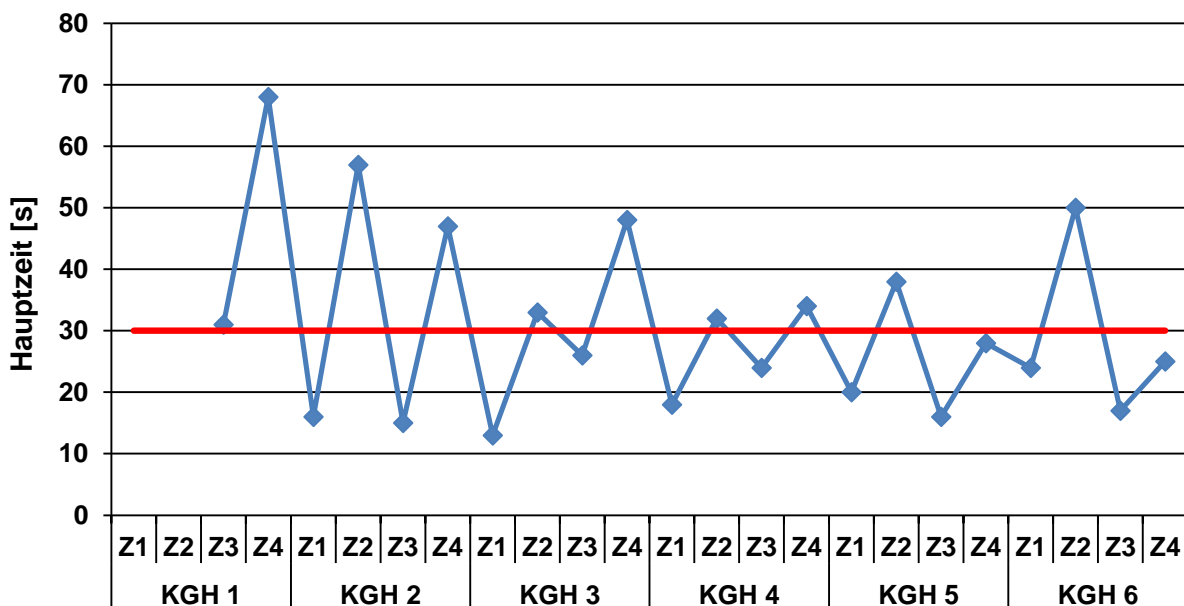


Bild 7.2: Verlauf der Hauptzeiten des Fertighonprozesses (SC220)

### 7.1.1 Ursachenanalyse mit Hilfe von Prozessdaten

Um die Ursache der hohen Hauptzeitstreuung zu identifizieren, wurden die Prozessdaten der jeweiligen Versuchsreihen näher betrachtet. Die während der Bearbeitung aufgezeichnete Prozesskraft zeigt für unterschiedliche Honsteinspezifikationen charakteristische, sich wiederholende Verläufe, siehe Bild 7.3. Auf eine kurze Hauptzeit folgt stets eine lange Hauptzeit und umgekehrt. Durch die grünen und roten Markierungen ist erkennbar, dass die kurzen Hauptzeiten in Z1 und Z3 aus der hohen Normalkraft bei Prozessstart (350-370 N) und die langen Hauptzeiten in Z4 und Z2 aus der niedrigen Normalkraft (230-250 N) resultieren.

Die Normalkraft bei Prozessstart  $F_{\text{Start}}$  kann als diejenige Kraft bezeichnet werden, die bei Prozessbeginn auf den Honstein wirkt, diesen auf die Zylinderlaufbahn drückt und dadurch eine Vorspannung aufgebaut wird. Ferner ist aus den Verläufen ersichtlich, dass die anfangs hohen Normalkräfte  $F_{\text{Start}}$  zu fallenden Kraftverläufen während der Bearbeitung führen, im Gegensatz dazu haben niedrige  $F_{\text{Start}}$  einen Anstieg der Kraft zur Folge. Unterschiedliche  $F_{\text{Start}}$  beeinflussen also das Schneidverhalten des SiC-Honsteins und führen dadurch zu unterschiedlichen Hauptzeiten.

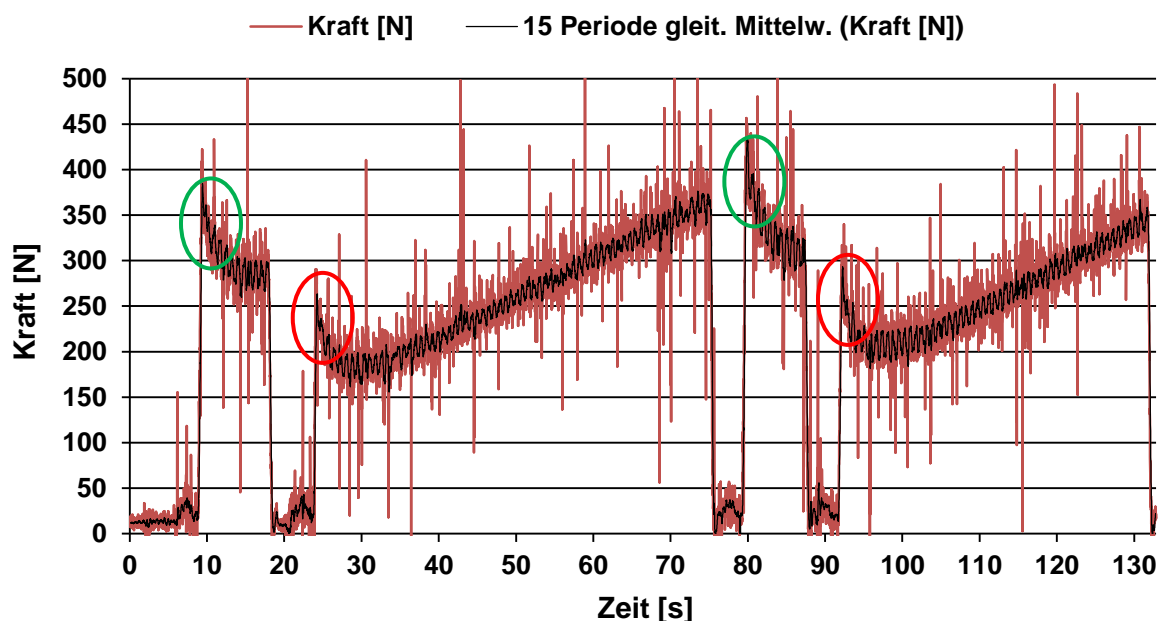


Bild 7.3: Charakteristischer Kraftverlauf beim Fertighonen (1 KGH)

Es kann festgehalten werden, dass der SiC-Honstein eine Mindest-  $F_{\text{Start}}$  benötigt, um schneidfähig zu sein. Dies geht aus dem Selbstschärfeffekt des SiC-Honsteins hervor. Bei hohen  $F_{\text{Start}}$  steigt der Bindungsverschleiß, sodass scharfe Schneidkörner freigelegt werden und in einem verbesserten Materialabtrag resultieren. Hierbei sinkt im

Idealfall der Verlauf der Honkraft oder bleibt auf einem gleichen Niveau, da das Zeitspannungsvolumen ausreichend hoch ist, um den erforderlichen und aus der eingestellten Prozess-Zustellgeschwindigkeit  $z_v$  resultierenden Materialabtrag zu gewährleisten. Eine Krafterhöhung ist deshalb nicht notwendig. Ist  $F_{\text{Start}}$  zu niedrig, erfolgt kein Bindungsverschleiß. Die Schneidkörner stumpfen aufgrund der zu hohen Haftkräfte in der Bindung ab. Im Kraftverlauf ist dabei erkennbar, dass die Honkraft zur Einhaltung des erforderlichen Materialabtrags ansteigt.

Eine weitere wichtige Größe bei der Ursachenanalyse stellt die EMZ-Verschleißkompensation dar. Dieser Wert wird von der Steuerung der Honmaschine berechnet und berücksichtigt den kontinuierlichen Honsteinverschleiß. Diese Größe ist gerade beim Honen mit SiC sehr wichtig, da hier der Verschleiß bis zu 15  $\mu\text{m}$  pro Bohrung betragen kann. Neben dem Verschleiß bildet die EMZ-Verschleißkompensation ebenfalls die Systemverspannung ab. Diese resultiert aus der Differenz der mechanischen Zustellung ( $V_{\text{mech}}$ ) über das Zustellsystem und dem tatsächlichen Abtrag der Honsteine ( $V_{\text{Abtrag}}$ ). Somit gilt folgender Zusammenhang:

$$V_{\text{mech}} = V_{\text{Abtrag}} \rightarrow \text{Systemverspannung} = 0$$

$$V_{\text{mech}} > V_{\text{Abtrag}} \rightarrow \text{Systemverspannung} > 0$$

Folglich ist die Systemverspannung in großem Maße von der Schneidfähigkeit des Honsteins abhängig. Das nachfolgende Bild 7.4 stellt die Hauptzeiten und die EMZ-Verschleißkompensation der Maschine des Zylinderkurbelgehäuses aus Bild 7.3 dar.

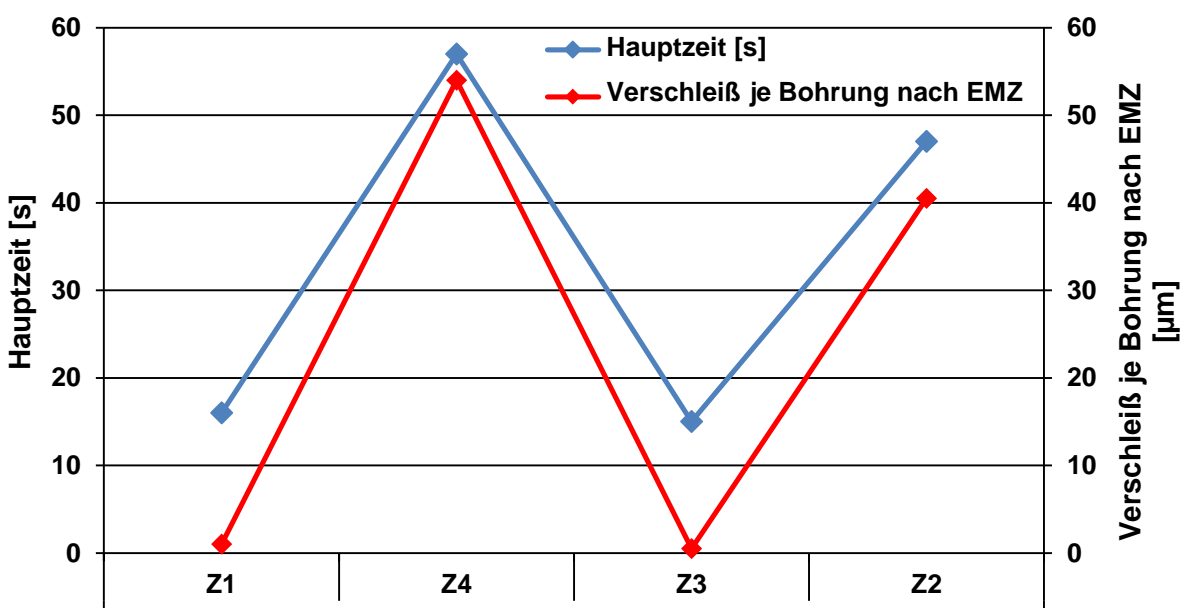


Bild 7.4: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation des Fertighonprozesses

Es ist ersichtlich, dass auf eine geringe Verschleißkompensation eine lange Hauptzeit und auf eine hohe Verschleißkompensation eine kurze Hauptzeit folgt. Es tritt also abwechselnd in einem Honvorgang einer Zylinderbohrung nahezu keine Verschleißkompensation und im darauffolgenden Honvorgang der nächsten Zylinderbohrung eine hohe EMZ-Verschleißkompensation auf. Die erläuterte, regelmäßig in jeder Zylinderbohrung abwechselnde Hauptzeit- und EMZ-Verschleißkompensationabfolge zeigt sich auch in der Betrachtung des Fertighonens mehrerer Zylinderkurbelgehäuse innerhalb eines Versuchs, siehe Bild 7.5.

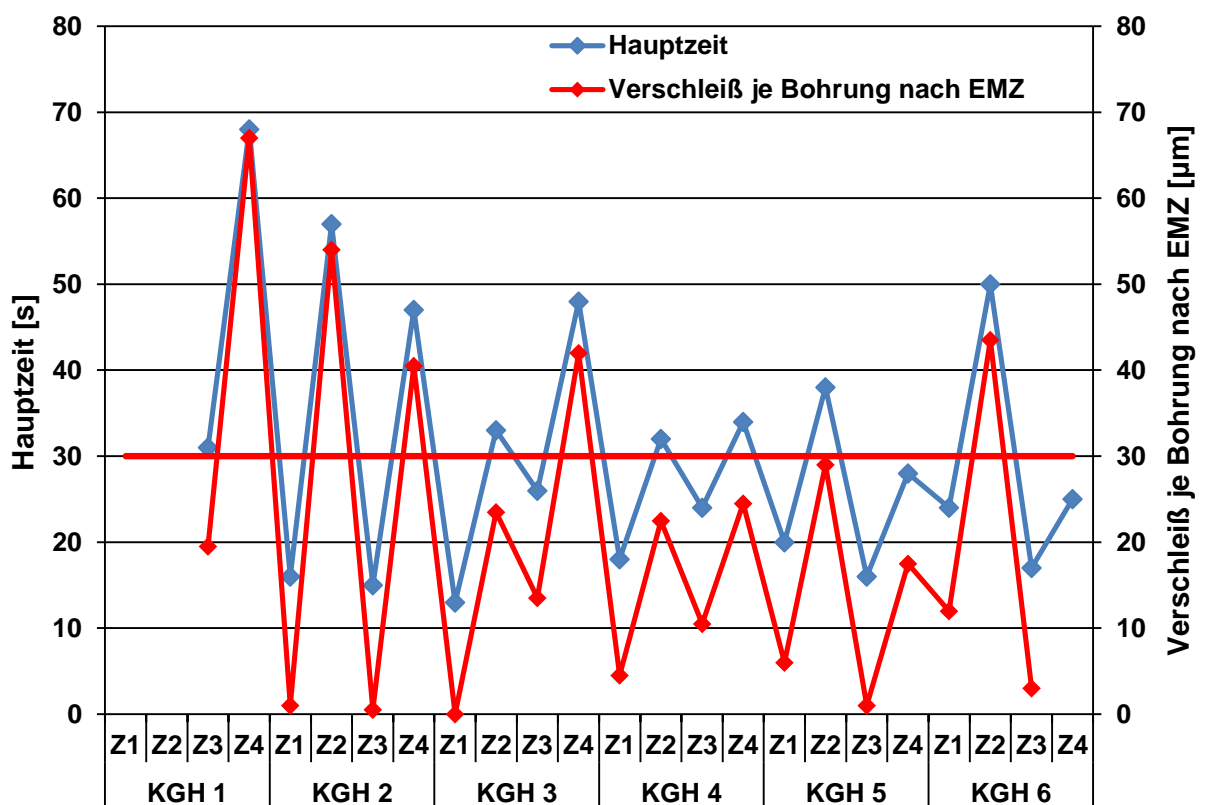


Bild 7.5: Honzeit und EMZ-Verschleißkompensation im Fertighonprozess mehrerer Zylinderkurbelgehäuse

Die Schwankungen der Hauptzeiten und der EMZ-Verschleißkompensation können folgendermaßen gedeutet werden:

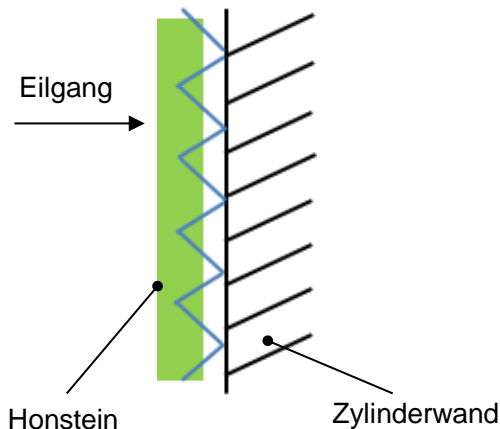
Liegt ein schlechtes Schneidverhalten des Honsteins vor, erfolgt ein Kraftaufbau und es gilt  $V_{\text{mech}} > V_{\text{Abtrag}}$ . Durch die Systemverspannung wird ein größerer Honsteinverschleiß berechnet. Das hat in der nachfolgenden Zylinderbohrung zur Folge, dass die Honsteine im Eilgangvorschub (ca.  $1500 \mu\text{m/s}$ ) auf die Bohrungswand treffen. Dadurch steigt kurzzeitig die Honkraft an, der Honstein wird dadurch impulsartig geschärft und dadurch schneidfähig. In dieser Zylinderbohrung gilt dann  $V_{\text{mech}} \approx V_{\text{Abtrag}}$ ,

die Systemverspannung ist vernachlässigbar. Folglich wird der tatsächliche Honsteinverschleiß berechnet. Im Falle eines extrem aggressiven Schneidens kann der Verschleiß durch eine fehlerhafte EMZ-Berechnung auch Null betragen. Die Honsteine treffen nicht mehr im Eilgangvorschub auf die Bohrungswand, der impulsartige Schärfeffekt durch die höhere  $F_{\text{Start}}$  bleibt aus und es erfolgt während der Honoperation ein Kraftaufbau aufgrund der schlechten Schneidfähigkeit des Honsteins, es gilt  $V_{\text{mech}} > V_{\text{Abtrag}}$ , siehe Bild 7.6. Offensichtlich hat  $F_{\text{Start}}$  mit dem resultierenden Schärfeffekt des Honsteins zu Beginn der Honoperation eine große Auswirkung auf das Schneidverhalten des Honsteins. Im Folgenden soll  $F_{\text{Start}}$  durch gezielte Optimierungen der Maschinenparameter auf ein höheres, definiertes Niveau angehoben werden.

### $V_{\text{mech}} > V_{\text{Abtrag}}$

Schlechtes Schneidverhalten führt zu Systemverspannung, die von der Steuerung als hoher Verschleiß berechnet und in der nächsten Bohrung kompensiert wird

→ Honstein fährt im Eilgang auf die Zylinderwand → aggressives Schneiden  
→ kurze Honzeit



### $V_{\text{mech}} = V_{\text{Abtrag}}$ mit aggressivem Schneiden

Durch aggressives Schneiden wird kein Verschleiß berechnet und in der nächsten Bohrung nicht kompensiert

→ Honstein ist zu weit von Bohrungswand entfernt → keine Schärfung → hohe Honzeit

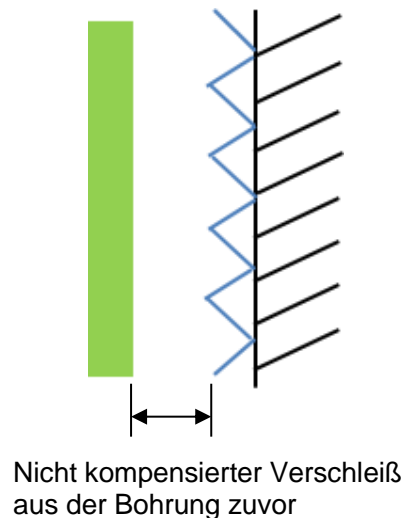


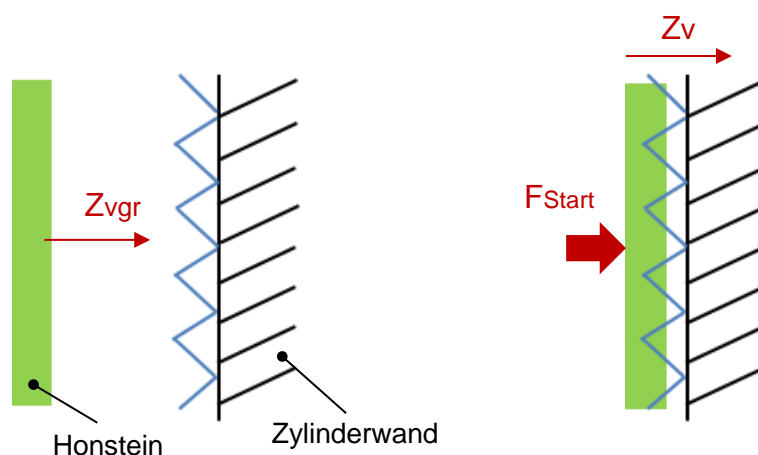
Bild 7.6: Grafische Darstellung von Systemverspannung, Verschleiß und Schneidverhalten

## 7.2 Optimierung der Schneidfähigkeit durch Integration neuer Parameter

Die Optimierung der Maschinenparameter erfolgt in zwei Teilschritten: Im ersten Schritt werden die Parameter  $F_{\text{Start}}$  und Eilvorschubgeschwindigkeit integriert. Als zweiter Schritt folgt die Integration der Parameter zur minimalen und maximalen Verschleißkompensation. Das Ziel dieser Parameteranpassungen ist es, den Honstein zu Beginn des Honvorgangs zu schärfen und damit die hohe Hauptzeitstreuung zu reduzieren.

### 7.2.1 Normalkraft bei Prozessstart und Eilvorschubgeschwindigkeit

Als Maßnahme zur Reduzierung der Hauptzeitschwankungen im Fertighonprozess soll der Prozessstart auf einem höheren Kraftniveau erfolgen. Hierzu werden zwei neue Parameter in die Maschinensteuerung integriert: Der Parameter  $F_{\text{Start}}$  legt die Kraftschwelle für die EMZ zu Beginn der Honoperation fest. Zusätzlich wird eine Eilvorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{vgr}}$  definiert. Dieser Parameter ermöglicht ein schnelleres Anlegen der Honsteine auf die Zylinderlaufbahn. Die Eilvorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{vgr}}$  liegt um ein Vielfaches über der eigentlichen Prozess-Vorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{v}}$ . Der Übergang von der Eilvorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{vgr}}$  auf die Prozess-Vorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{v}}$  erfolgt nach Erreichung von  $F_{\text{Start}}$ , siehe Bild 7.7.



- Eilvorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{vgr}}$  wirkt, wenn der Honstein zu weit von der Bohrung entfernt ist (Verschleiß wurde nicht kompensiert)
- Es erfolgt ein Kraftaufbau bis  $F_{\text{Start}}$  erreicht ist
- Umstellung von  $z_{\text{vgr}}$  auf Prozesszustellung  $z_{\text{v}}$

Bild 7.7: Grafische Darstellung der neuen Parameter  $F_{\text{Start}}$  und  $z_{\text{vgr}}$

Wie aus Bild 7.3 ersichtlich, haben die hohen  $F_{\text{Start}}$  von ca. 370 N sehr kurze Hauptzeiten zur Folge und resultieren in einem hohen Honsteinverschleiß. Ein Kraftniveau bei ca. 250 N führt dagegen zu langen Hauptzeiten. Somit wird für  $F_{\text{Start}}$  ein Kraftniveau von 330 N definiert. Die Eilvorschubgeschwindigkeit  $z_{\text{vgr}}$  beträgt  $15 \mu\text{m/s}$ , bei einer Prozesszustellung von  $z_v = 2 \mu\text{m/s}$ .

Nachfolgend wird ein Diagramm zu einem Versuch an mehreren Zylinderkurbelgehäusen mit den neuen Maschinenparametern  $F_{\text{Start}}$  und  $z_{\text{vgr}}$  dargestellt, siehe Bild 7.8. Darin wird ersichtlich, dass die Hauptzeitzeitschwankungen deutlich reduziert und die in jeder Zylinderbearbeitung regelmäßig abwechselnde Hauptzeit- und EMZ-Verschleißkompensationabfolge eliminiert werden konnten. Zudem liegen die Hauptzeiten unter 30 s, bis auf zwei Ausreißer, die auf niedrige  $F_{\text{Start}}$  und damit schlechtes Schneidverhalten zurückzuführen sind. Trotz Reduzierung, sind die Hauptzeit-schwankungen weiterhin in unregelmäßiger Abfolge vorhanden. Die Spannweite der Streuung liegt bei 34 s, dagegen lag die Spannweite des nicht optimierten Prozesses bei 54 s (Bild 7.5).

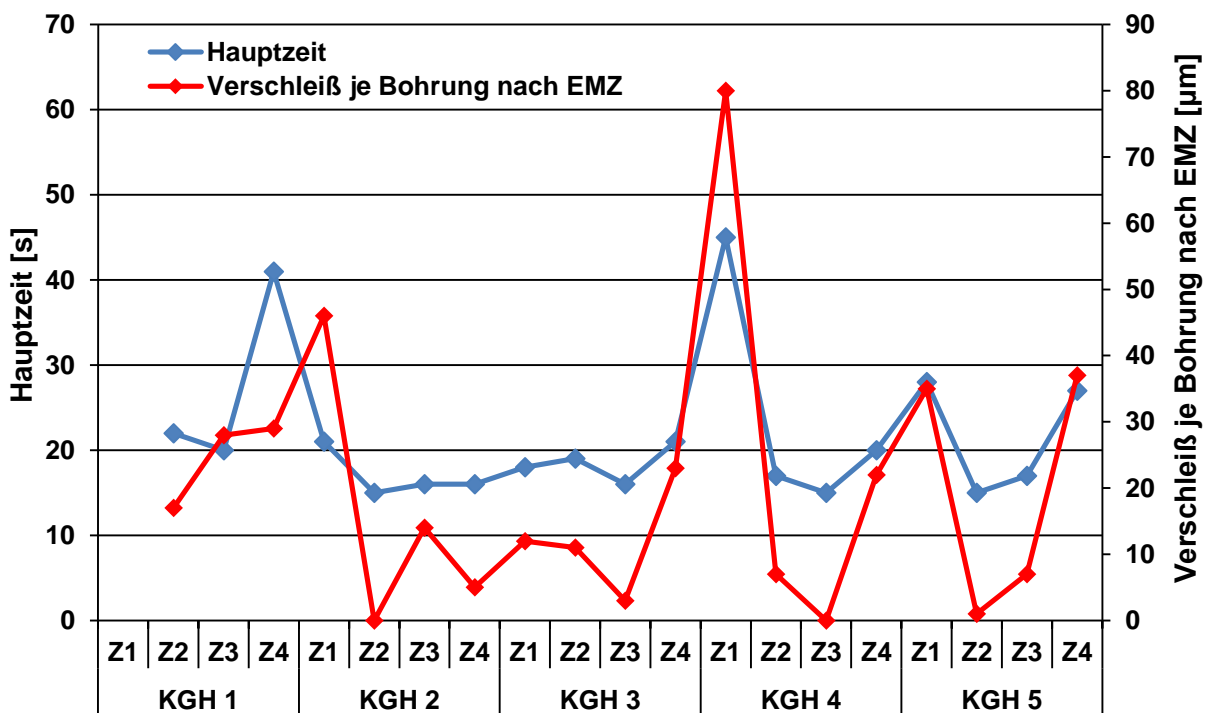


Bild 7.8: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation mit neuen Parametern  $F_{\text{Start}}$  und  $z_{\text{vgr}}$  im Fertighonprozess



Die Analyse der nachfolgenden Kraftverläufe zeigt, dass durch die Integration der zwei neuen Maschinenparameter  $F_{\text{Start}}$  (bei 330 N) und  $z_{\text{vgr}}$  (15  $\mu\text{m/s}$ ) die Hauptzeit-schwankungen zwar reduziert, aber nicht komplett eliminiert werden konnten, siehe Bild 7.9 und Bild 7.10.

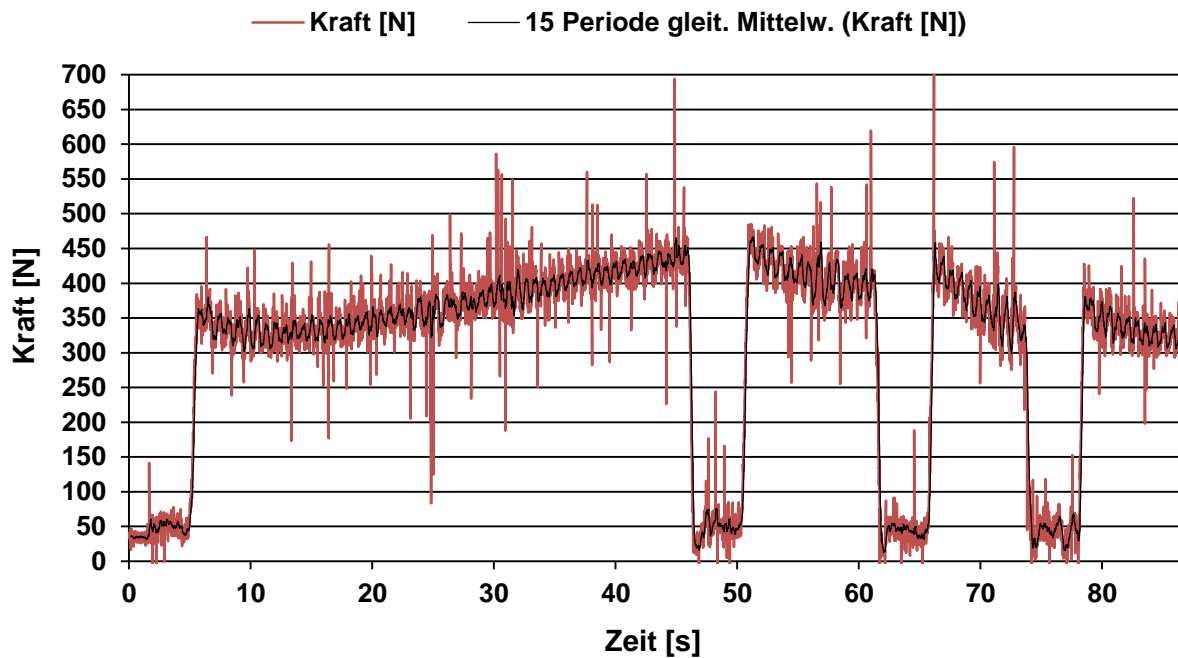


Bild 7.9: Kraftverlauf nach optimierter  $F_{\text{Start}}$  (KGH 4, Z1-Z4)

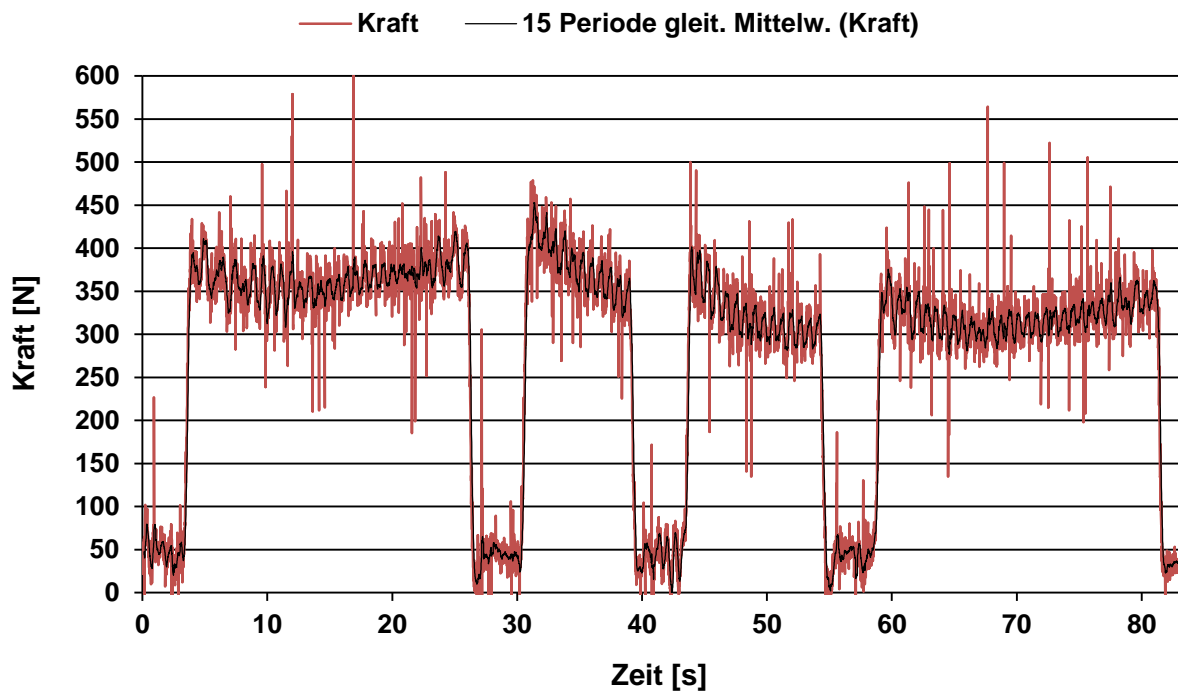


Bild 7.10: Kraftverlauf nach optimierter  $F_{\text{Start}}$  (KGH 5, Z1-Z4)

Trotz der definierten  $F_{\text{Start}}$  von 330 N bewegt sich das Kraftniveau zu Beginn der Bearbeitung zwischen 330 und 400 N. Dies deutet darauf hin, dass die alleinige Festlegung von  $F_{\text{Start}}$  auf ein höheres Kraftniveau zur Eliminierung der auftretenden Hauptzeitschwankungen unzureichend ist. Es bedarf hier einer näheren Betrachtung der EMZ-Verschleißkompensation, da diese die Kraft zu Bearbeitungsbeginn durch eine „Kompensation der Systemverspannung“ ebenfalls beeinflusst.

### 7.2.2 Minimale und maximale Verschleißkompensation

Ein weiteres Potential zur Beeinflussung von  $F_{\text{Start}}$  liegt in der Optimierung der EMZ-Verschleißkompensation. Wie bereits in Kapitel 7.1.1 erläutert, hat ein schlecht schneidender Honstein einen Kraftanstieg zur Folge, der in einer Systemverspannung und damit einem höher berechneten Verschleiß resultiert, es gilt  $V_{\text{mech}} > V_{\text{Abtrag}}$ . In der nachfolgenden Zylinderbohrung trifft der Honstein im Eilgangvorschub auf die Bohrungswand, da mehr Verschleiß bzw. Systemverspannung kompensiert wird als tatsächlich erforderlich ist. Dies führt zu schwankenden  $F_{\text{Start}}$  und Hauptzeiten.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, werden zwei weitere Parameter in die Steuerung integriert. Der Parameter zur minimalen Verschleißkompensation MINkorr legt einen Mindestwert für die EMZ-Verschleißkompensation (Honsteinverschleiß) fest. Mit dem Parameter MAXkorr wird ein Höchstwert für die EMZ-Verschleißkompensation definiert und soll bei schlechtem Schneidverhalten die Systemverspannung berücksichtigen. Aus Bild 7.5 ist ersichtlich, dass die EMZ-Verschleißkompensation ohne die neuen Parameter eine Streubreite von 0-70  $\mu\text{m}$  aufweist. In einem weiteren Versuch werden die neuen Parameter wie folgt festgelegt:

$$\text{MINkorr} = 10\mu\text{m}$$

$$\text{MAXkorr} = 40\mu\text{m}$$

$$F_{\text{Start}} = 330 \text{ N}$$

$$Z_{\text{vgr}} = 20\mu\text{m/s}$$

Aus Bild 7.11 geht hervor, dass mit den zusätzlich optimierten Parametern zur Korrektur der Verschleißkompensation MINkorr und MAXkorr in Kombination mit den Parametern  $F_{\text{Start}}$  und  $Z_{\text{vgr}}$  die Hauptzeitschwankungen nahezu vollständig eliminiert werden konnten. Die Spannweite der Hauptzeitstreuung beträgt 5 s, vor der Optimierung mit den Parametern MINkorr/MAXkorr lag diese bei 34 s. Ferner ist aus dem Diagramm

ersichtlich, dass der Parameter MINKorr bei 10 Honoperationen aktiv war, der Parameter MAXkorr bei 3 Honoperationen. Durch diese Parameter wird der reale Honsteinverschleiß ohne Systemverspannung abgebildet.

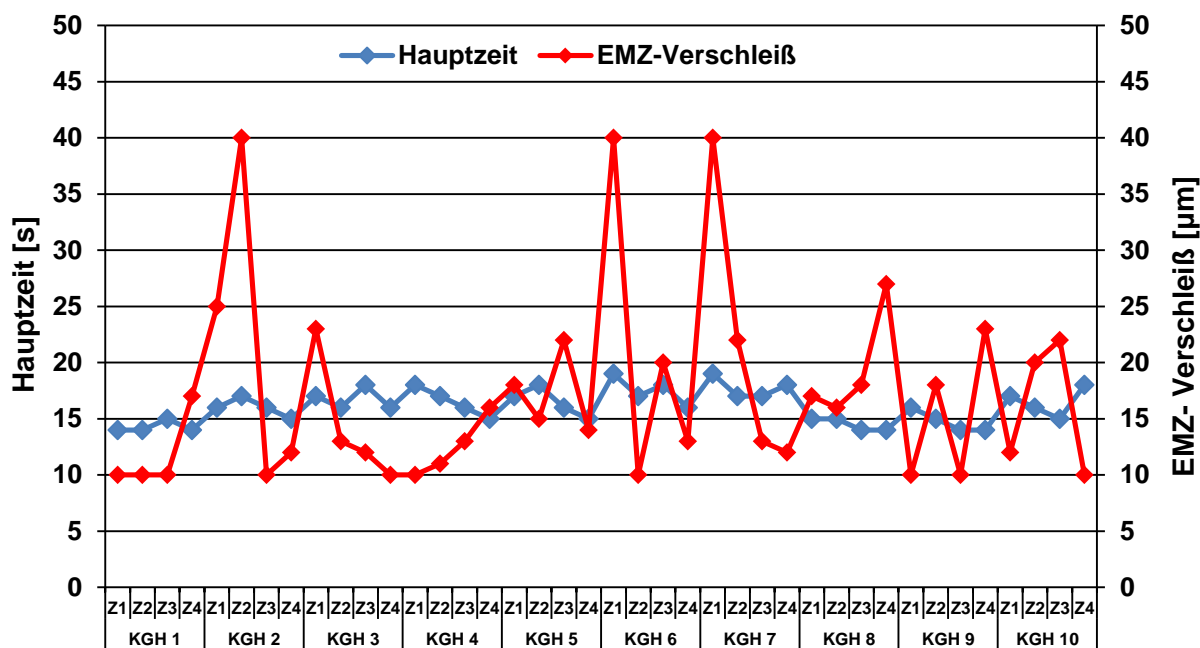


Bild 7.11: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation mit neuer Parametrierung

Die Detailbetrachtung der Kraftverläufe innerhalb eines Zylinderkurbelgehäuses (4 Bohrungen) nach der Optimierung zeigt, dass  $F_{\text{Start}}$  stabil zwischen 330 und 350 N liegt, siehe Bild 7.12. Auch verbleibt der Kraftverlauf während der Honbearbeitung auf diesem Kraftniveau ohne deutlichen Kraftaufbau oder -abbau. Die Hauptzeitschwankungen werden minimiert und der Fertighonprozess dadurch stabilisiert.

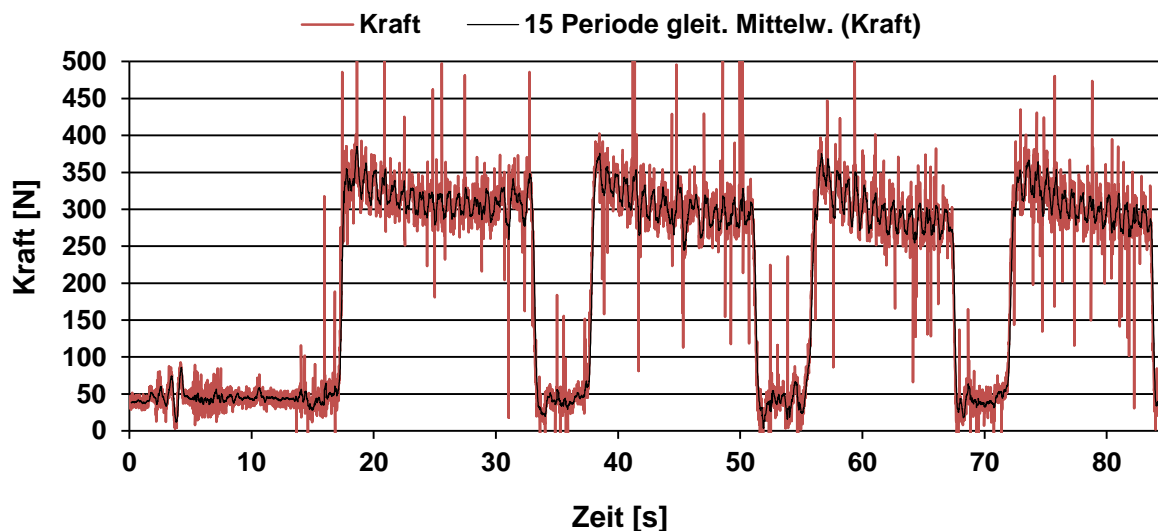


Bild 7.12: Kraftverlauf nach Integration der Parameter MINKorr/MAXkorr und  $F_{\text{Start}}/Z_{\text{vgr}}$  (KGH 9)

### 7.3 Qualifizierung eines Honsteins für den Fertighonprozess

Zur Verifikation der Erkenntnisse aus Kapitel 7.2 werden im Folgenden 2 weitere Honsteine mit unterschiedlichen Härtegraden im optimierten Fertighonprozess eingesetzt. Die Bewertung der Honsteine hinsichtlich eines möglichen Einsatzes in der Serienfertigung erfolgt im Rahmen dieser Versuchsreihen nach folgenden Kriterien:

1. Sicherstellung der **Qualität** (Oberfläche, Zylinderformkennwerte) zur Gewährleistung einer funktionsfähigen Zylinderlaufbahn
2. Einhaltung der vom Linientakt abgeleiteten **Hauptzeit** des Honprozesses zur Sicherstellung der Ausbringung in der Fertigung
3. Erreichung der **Standmenge** eines Honsteins, um die laufenden Fertigungskosten möglichst niedrig zu halten

In Tabelle 7.1 sind die Zielkennwerte (Ausgangsgrößen) für die Versuchsreihen zusammengefasst. Bei der Berechnung der Standmenge wird von einer real nutzbaren Belaghöhe des Honsteins von 6,5 mm ausgegangen.

Tabelle 7.1: Zielgrößen für die Versuche zur Qualifizierung der Fertighonsteine

Zielgrößen			
Oberfläche	Soll	$C_{mk}=1,67$	Messequipment
V-Öl-Honen [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	$\leq 150$	-	Hommel T8000
V-Öl-Poren [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	$\leq 150$	-	
Porenlängenanteil [%]	$\leq 6$	-	
Zylinderform			
Rundheit [ $\mu\text{m}$ ]	$\leq 10$	6	Incometer
Geradheit [ $\mu\text{m}$ ]	$\leq 10$	6	
Parallelität [ $\mu\text{m}$ ]	$\leq 20$	12	
<b>Hauptzeit FH [s]</b>	$\leq 30$	-	Honmaschine
Hauptzeitstreuung FH [s]	$\leq 15$	-	Berechnung
Verschleiß/Bohrung [ $\mu\text{m}$ ]	$\leq 6,5$	-	Bügelmessschraube
<b>Standmenge [Bohrungen]</b>	$\geq 1000$	-	Berechnung

### 7.3.1 Versuchsergebnisse für Honstein SC220

Der Honstein SC220 wurde bereits in den Voruntersuchungen zur Hauptzeitstreuung eingesetzt. Zur Bewertung der Endoberfläche hinsichtlich der relevanten Kennwerte werden die Kurbelgehäuse nach dem Fertighonen mit dem Glätthonstein SC500 fertigbearbeitet. In Tabelle 7.2 sind die Eingangsgrößen für den Fertighon- und Glätthonprozess dargestellt:

Tabelle 7.2: Eingangsgrößen für den Fertighon-/Glätthonprozess; SC220/SC500

Eingangsgrößen Fertighonen (weggesteuert, Abschaltart: Luftmessung)		Eingangsgrößen Glätthonen (kraftgesteuert, Abschaltart: Zeit)	
Honstein	SC220	Honstein	SC500
Rauigkeit Eingangsoberfläche	8-10 $\mu\text{m}$	Rauigkeit Eingangsoberfläche	2-2,5 $\mu\text{m}$
Drehzahl	350 U/min	Drehzahl	350 U/min
Hubgeschwindigkeit	17 m/min	Hubgeschwindigkeit	17 m/min
Zustellgeschwindigkeit	2 $\mu\text{m/s}$	Glättkraft	22 bar
Schrittgröße	1 $\mu\text{m}$	Glättzeit	20 s
<b>F<sub>Start</sub></b>	<b>330 N</b>		
Zvgr	20 $\mu\text{m/s}$		
MINkorr/MAXkorr	10 $\mu\text{m}/40 \mu\text{m}$		
Kraftbegrenzung	-		

Die Hauptzeitverläufe können Bild 7.11 entnommen werden. Ferner ist in Bild 7.13 nochmals exemplarisch der Kraftverlauf für KGH 8 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Hauptzeitanforderung für das Fertighonen ( $< 30 \text{ s}$ ) erfüllt wird. Ebenso ist die Hauptzeitstreuung deutlich reduziert und der Honstein zerspannt auf einem Kraftniveau von 330 N.

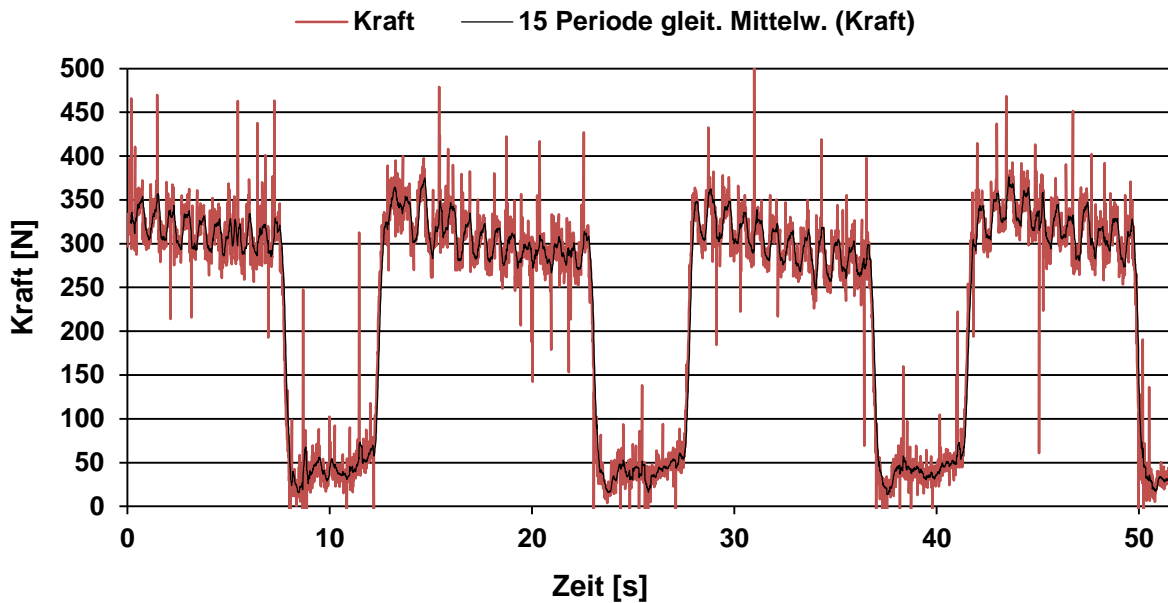


Bild 7.13: Kraftverlauf für Honstein SC220 (KGH 8)

In der folgenden Tabelle 7.3 sind zusammenfassend die Ausgangsgrößen für die Honsteinkombination SC220/SC500 dargestellt:

Tabelle 7.3: Ausgangsgrößen Endoberfläche; Honsteine SC220/SC500

Ausgangsgrößen Endoberfläche						
	Min	Max	Ø	Soll	$C_{mk}=1,67$	Messequipment
V-Öl-Honen [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	90	103	96,9	150	-	Hommel T8000
V-Öl-Poren [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	14	182	75,4	150	-	
Porenlängenanteil [%]	0,47	3,54	1,7	6	-	
Rundheit [ $\mu\text{m}$ ]	1,7	5	3,3	10	6	Incometer
Geradheit [ $\mu\text{m}$ ]	0,7	3,5	1,8	10	6	
Parallelität [ $\mu\text{m}$ ]	2,4	8,4	4,2	20	12	
Hauptzeit [s]	14	19	16	30	-	Honmaschine
Hauptzeitstreuung [s]	-	-	5	15	-	Berechnung
Prozesskraft [N]	320	350	330	-	-	Honmaschine
Verschleiß/Bohrung [ $\mu\text{m}$ ]	-	-	8	6,5	-	Bügelmessschraube
Standmenge [Bohrungen]	-	-	812	1000	-	Berechnung

Mit den Honsteinen SC220 (Fertighonen) und SC500 (Glätthonen) werden alle qualitativen Anforderungen hinsichtlich Oberfläche und Form erfüllt. Lediglich der angestrebte Richtwert für die Standmenge von 1000 Bohrungen wird nicht erreicht (812

Bohrungen), ist jedoch im Hinblick auf einen Serieneinsatz gerade noch akzeptabel. Neben den messtechnischen Kennwerten werden Weißlichtinterferometrie-Aufnahmen der Endoberfläche angefertigt. Diese erlauben Aussagen über die Qualität bzw. Beschaffenheit der gehonten Oberfläche, wobei insbesondere das Schnittbild, die Reststruktur, die Porenöffnung und die Verrundung der Porenränder bewertet werden. Bild 7.14 illustriert repräsentativ einen direkten Vergleich zwischen einer SiC-Honung (SC220/SC500) und einer Diamanthonung.

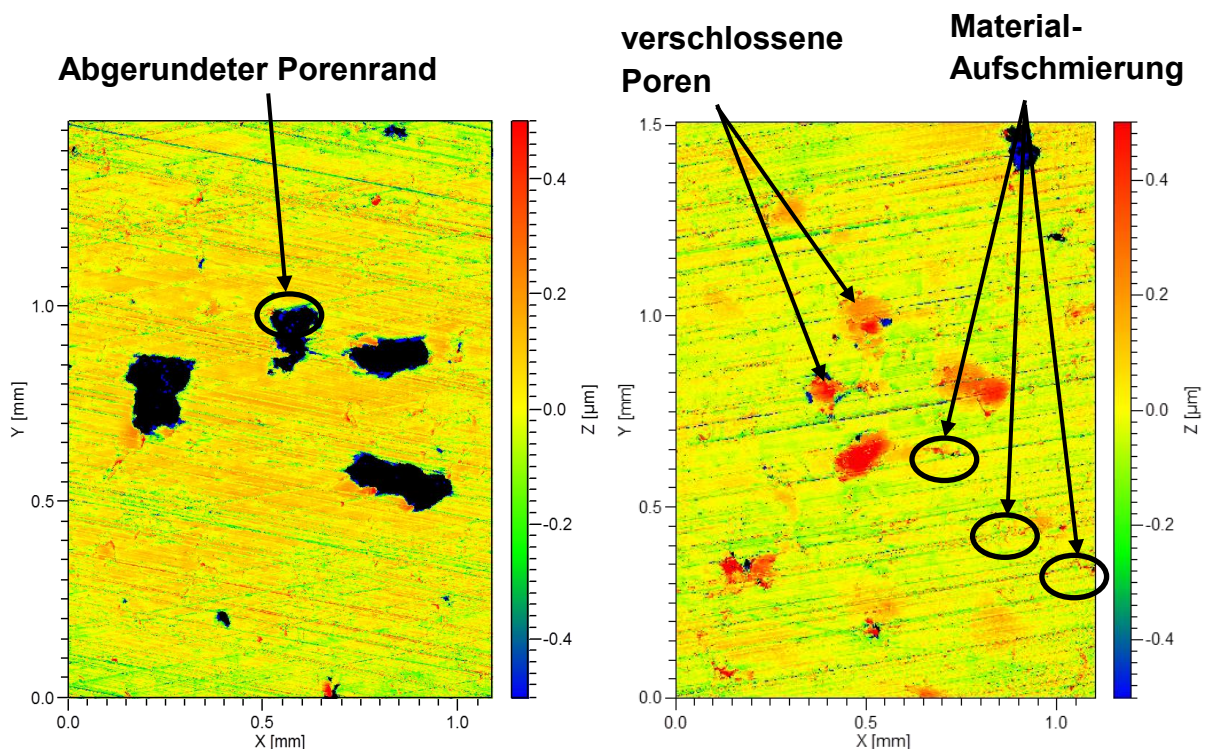


Bild 7.14: Vergleich von WLI-Aufnahmen einer SiC-Honung (links) und einer Diamanthonung (rechts)

Aus den WLI-Aufnahmen ist ersichtlich, dass die SiC-Honung ein gleichmäßigeres Schnittbild erzeugt als die Diamanthonung. Darüber hinaus werden durch die SiC-Honung mehr Poren freigeschnitten, die in ihren Randbereichen abgerundet sind und somit weniger Verschleiß am Kolbenring verursachen. Diese Poren- bzw. Einzugsverrundung ist charakteristisch für die Siliziumkarbid-Honung und von der Daimler AG patentrechtlich geschützt [Daim15]. Des Weiteren sind, im Gegensatz zur Diamanthonung, keine Material-Aufschmierungen zu erkennen (analog der Blechmantelbildung beim Grauguss). Die qualitativen Vorteile der SiC-Honung lassen sich durch die unregelmäßige Struktur eines Siliziumkarbidkorns erklären. Die zahlreichen Schneidkanten haben ein verbessertes Schneidverhalten zur Folge. Daraus resul-



tieren das gleichmäßige Schnittbild, die bessere Porenöffnung sowie die kaum vorhandene Material-Aufschmierung. Weiterhin kann von einer Elastizität des SiC-Honsteins ausgegangen werden. Dadurch wird ein besseres Eindringen des Honsteins in die Poren und damit eine Porenverrundung ermöglicht. Die verbesserte Oberflächenbeschaffenheit der SiC-Honung belegen ebenfalls weitere WLI-Aufnahmen der Honsteinkombination SC220/SC500 in Bild 7.15.

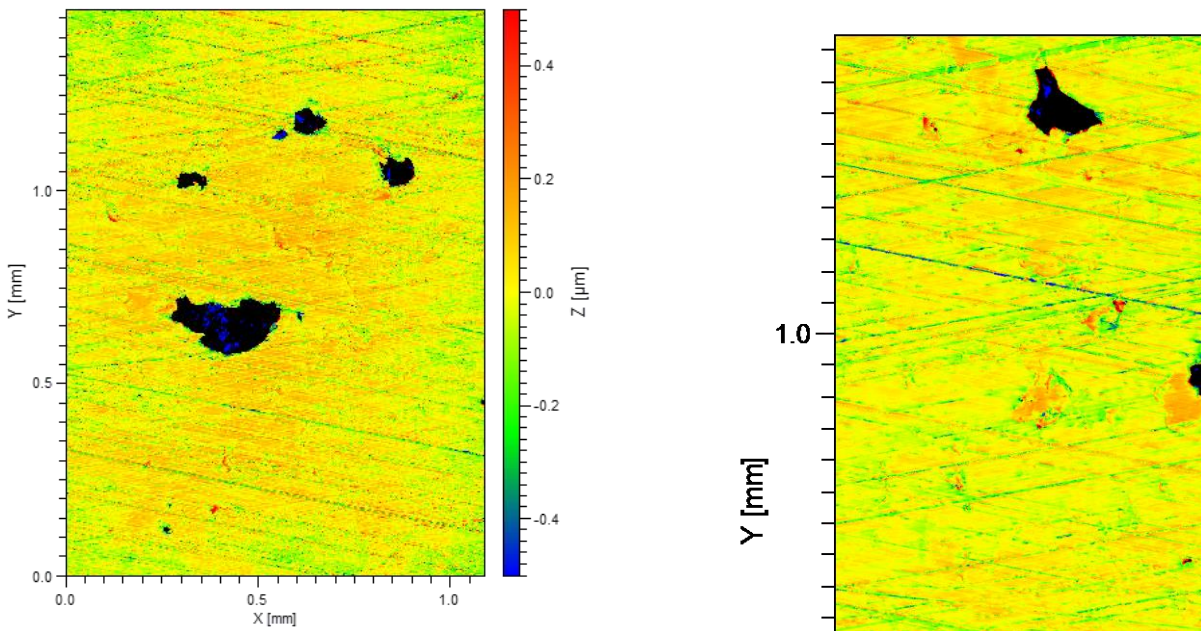


Bild 7.15: Weitere WLI-Aufnahmen der Siliziumkarbid-Honung (Honsteinkombination: SC220/SC500)

### 7.3.2 Versuchsergebnisse für Honstein SC180\_1

In einem weiteren Schritt wird ein Honstein eines Alternativherstellers getestet. Dieser Honstein SC180\_1 hat im Vergleich zum Honstein SC220 eine gröbere Körnung. Die Eingangsgrößen für den Versuch können Tabelle 7.4 entnommen werden.



Tabelle 7.4: Eingangsgrößen für den Fertighon-/Glätthonprozess; SC180\_1/SC500

Eingangsgrößen Fertighonen (weggesteuert, Abschaltart: Luftmessung)		Eingangsgrößen Glätthonen (kraftgesteuert, Abschaltart: Zeit)	
Honstein	SC180_1	Honstein	SC500
Rauigkeit Eingangsoberfläche	8-10 $\mu\text{m}$	Rauigkeit Eingangsoberfläche	2-2,5 $\mu\text{m}$
Drehzahl	350 U/min	Drehzahl	350 U/min
Hubgeschwindigkeit	17 m/min	Hubgeschwindigkeit	17 m/min
Zustellgeschwindigkeit	2 $\mu\text{m/s}$	Glättkraft	22 bar
Schrittgröße	1 $\mu\text{m}$	Glättzeit	20 s
<b>F<sub>Start</sub></b>	<b>330/400 N</b>		
Zvgr	20 $\mu\text{m/s}$		
MINkorr/MAXkorr	10 $\mu\text{m}/40 \mu\text{m}$		
Kraftbegrenzung	-		

In Bild 7.16 sind die Hauptzeiten und die EMZ-Verschleißkompensation dargestellt. Es ist erkennbar, dass in den ersten beiden Zylinderbohrungen sehr hohe Hauptzeiten (41 s, 45 s) vorliegen. Ebenso ist in diesen Bohrungen der Parameter MAXkorr=40  $\mu\text{m}$  aktiv.

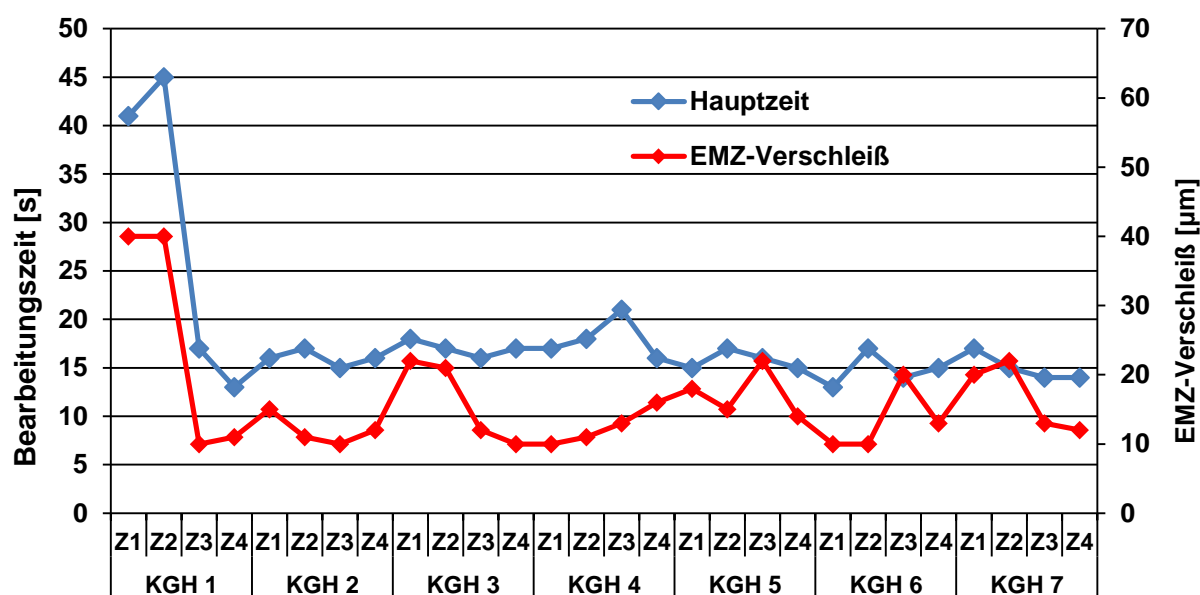


Bild 7.16: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation für Honstein SC180\_1

Betrachtet man die Kraftverläufe in den ersten beiden Zylinderbohrungen, fällt auf, dass der Honprozess bei  $F_{\text{Start}} = 330 \text{ N}$  startet und anschließend ein Kraftaufbau bis 500 N erfolgt (Bearbeitungsende Zylinderbohrung 2), siehe Bild 7.17.

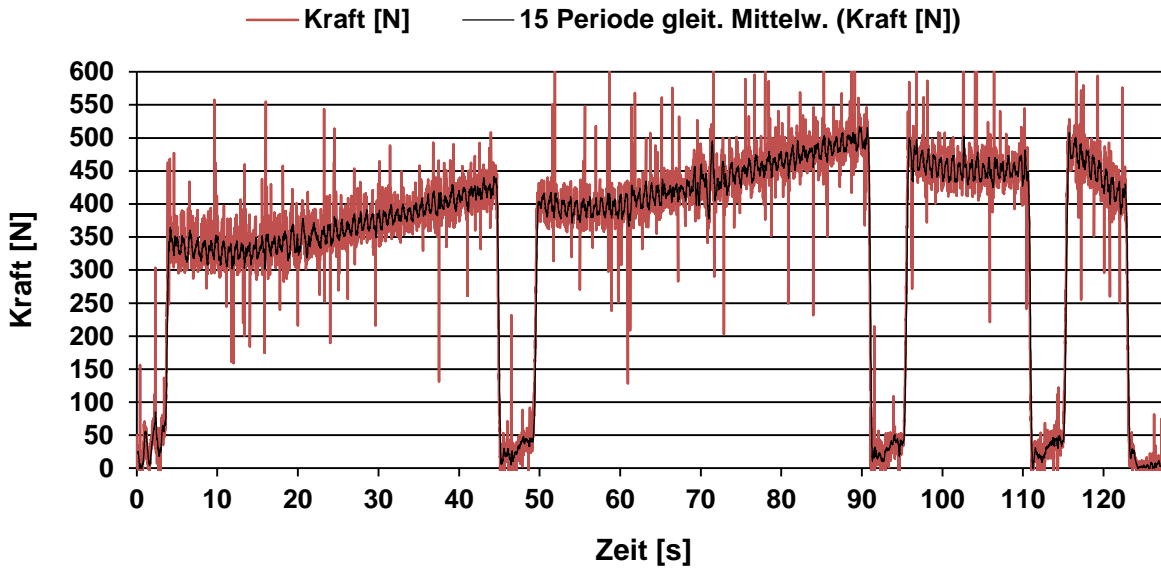


Bild 7.17: Kraftverlauf der ersten 4 Zylinderbohrungen

Offensichtlich ist  $F_{\text{start}}$  von 330 N bei dem Honstein SC180\_1 nicht ausreichend, um einen Schärfungseffekt zu erzielen. Deshalb wurde ab dem nächsten KGH  $F_{\text{start}}$  auf 400 N erhöht, um die Schneidfähigkeit zu steigern. Durch diese Parameteranpassung konnten die Hauptzeiten deutlich reduziert und stabilisiert werden ( $< 30$  s), siehe Bild 7.16 ab KGH 2. Die Kraftverläufe in Bild 7.18 bestätigen die Stabilisierung des Prozesses. Die  $F_{\text{start}}$  betragen hier 400-420 N, mit einem leicht fallenden Kraftverlauf zu Bearbeitungsende.

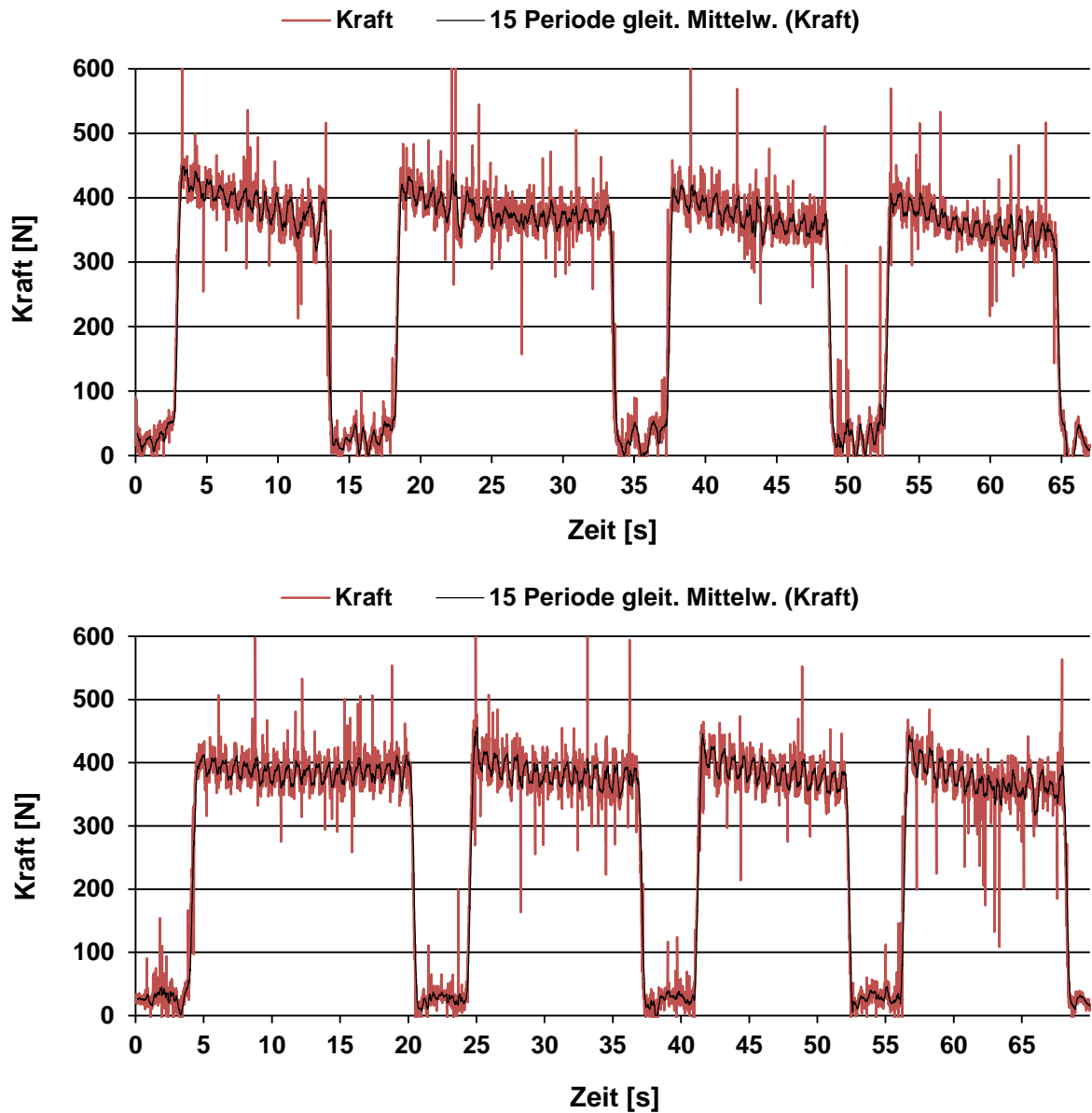


Bild 7.18: Kraftverlauf für KGH 6 (oben) und 7 (unten)

In Tabelle 7.5 sind die Ausgangsgrößen für die Honsteine SC180\_1/SC500 zusammengefasst:

Tabelle 7.5: Ausgangsgrößen Endoberfläche; Honsteine SC180\_1/SC500

Ausgangsgrößen Endoberfläche						
	Min	Max	Ø	Soll	$C_{mk}=1,67$	Messequipment
V-Öl-Honen [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	88	101	95,5	150	-	Hommel T8000
V-Öl-Poren [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	4	263	97,2	150	-	
Porenlängenanteil [%]	0,42	3,11	1,87	6	-	
Rundheit [ $\mu\text{m}$ ]	2,6	5,7	4,0	10	6	Incometer
Geradheit [ $\mu\text{m}$ ]	1,0	2,9	1,9	10	6	
Parallelität [ $\mu\text{m}$ ]	1,9	11,3	5,3	20	12	
Hauptzeit [s]	13	21	16	30	-	Honmaschine
Hauptzeitstreuung [s]	-	-	8	15	-	Berechnung
Prozesskraft [N]	400	420	410	-	-	Honmaschine
Verschleiß/Bohrung [ $\mu\text{m}$ ]	-	-	5,2	6,5	-	Bügelmessschraube
Standmenge [Bohrungen]			1250	1000	-	Berechnung

Auch der Honstein SC180\_1 erfüllt die Qualitätsanforderungen hinsichtlich Oberfläche und Form. Die Standmenge mit 1250 Bohrungen liegt über dem Soll-Wert und ist um ca. 400 Bohrungen höher als bei Honstein SC220.

Die Weißlichtinterferometrie-Aufnahmen der Endoberfläche in Bild 7.19 zeigen auch bei der Honsteinkombination SC180\_1/SC500 eine saubere, gleichmäßige Honstruktur ohne Restriefen des Fertighonprozesses. Weiterhin ist auf den Aufnahmen eine sehr gute Porenöffnung zu erkennen. Sogar sehr kleine Poren konnten durch den SiC-Prozess freigeschnitten werden.

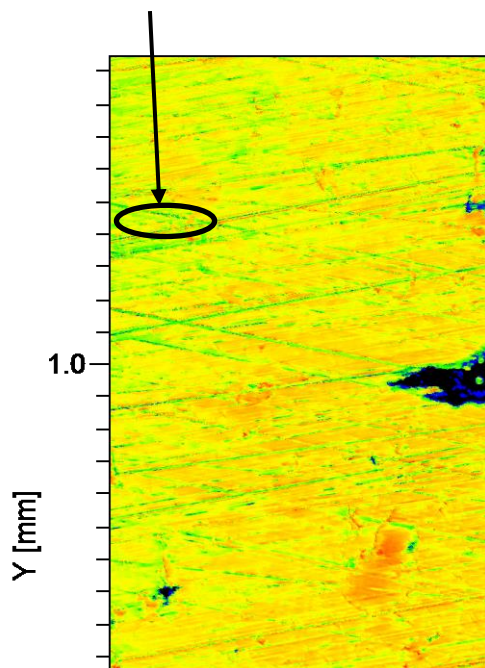
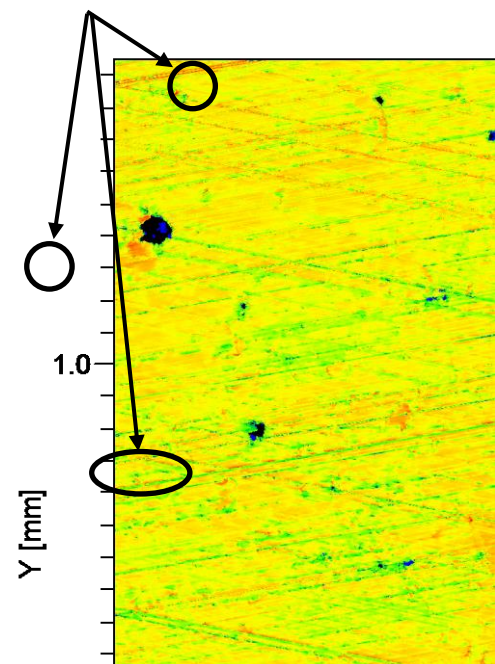
**Abgerundeter Porenrand****Sehr gute Porenöffnung**

Bild 7.19: WLI-Aufnahmen der Honsteinkombination SC180\_1/SC500

**7.3.3 Versuchsergebnisse für Honstein SC180\_2**

Es wird eine weitere Versuchsreihe mit dem Honstein SC180\_2 durchgeführt. Die Bindung ist im Vergleich zum Honstein SC180\_1 um eine Stufe härter und sollte in einer höheren Standmenge resultieren. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem härteren Honstein höhere Kräfte erforderlich sind, um die Schneidfähigkeit sicherzustellen. Daher wird  $F_{\text{Start}} = 460 \text{ N}$  höher festgelegt als bei dem Honstein SC180\_1. In Tabelle 7.6 sind die Eingangsgrößen für den Versuch dargestellt.

Tabelle 7.6: Eingangsgrößen für den Fertighon-/Glätthonprozess; SC180\_2/SC500

Eingangsgrößen Fertighonen (weggesteuert, Abschaltart: Luftmessung)		Eingangsgrößen Glätthonen (kraftgesteuert, Abschaltart: Zeit)	
Honstein	SC180_2	Honstein	SC500
Rauigkeit Eingangsoberfläche	8-10 $\mu\text{m}$	Rauigkeit Eingangsoberfläche	2-2,5 $\mu\text{m}$
Drehzahl	350 U/min	Drehzahl	350 U/min
Hubgeschwindigkeit	17 m/min	Hubgeschwindigkeit	17 m/min
Zustellgeschwindigkeit	2 $\mu\text{m/s}$	Glättkraft	22 bar
Schrittgröße	1 $\mu\text{m}$	Glättzeit	20 s
<b>F<sub>Start</sub></b>	<b>460 N</b>		
Zvgr	20 $\mu\text{m/s}$		
MINkorr/MAXkorr	10 $\mu\text{m}/40 \mu\text{m}$		
Kraftbegrenzung	-		

In Bild 7.20 sind die Hauptzeiten und die EMZ-Verschleißkompensation dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ein stabiler Hauptzeitenverlauf vorliegt und die Hauptzeit-Anforderung  $t_h < 30$  s erfüllt wird. Die Streuung der Hauptzeiten (8 s) ist eine Folge der Aufmaßschwankungen im Fertighonprozess, z.B. lag in KGH 6 ein um 5  $\mu\text{m}$  geringeres Zerspanaufmaß vor.

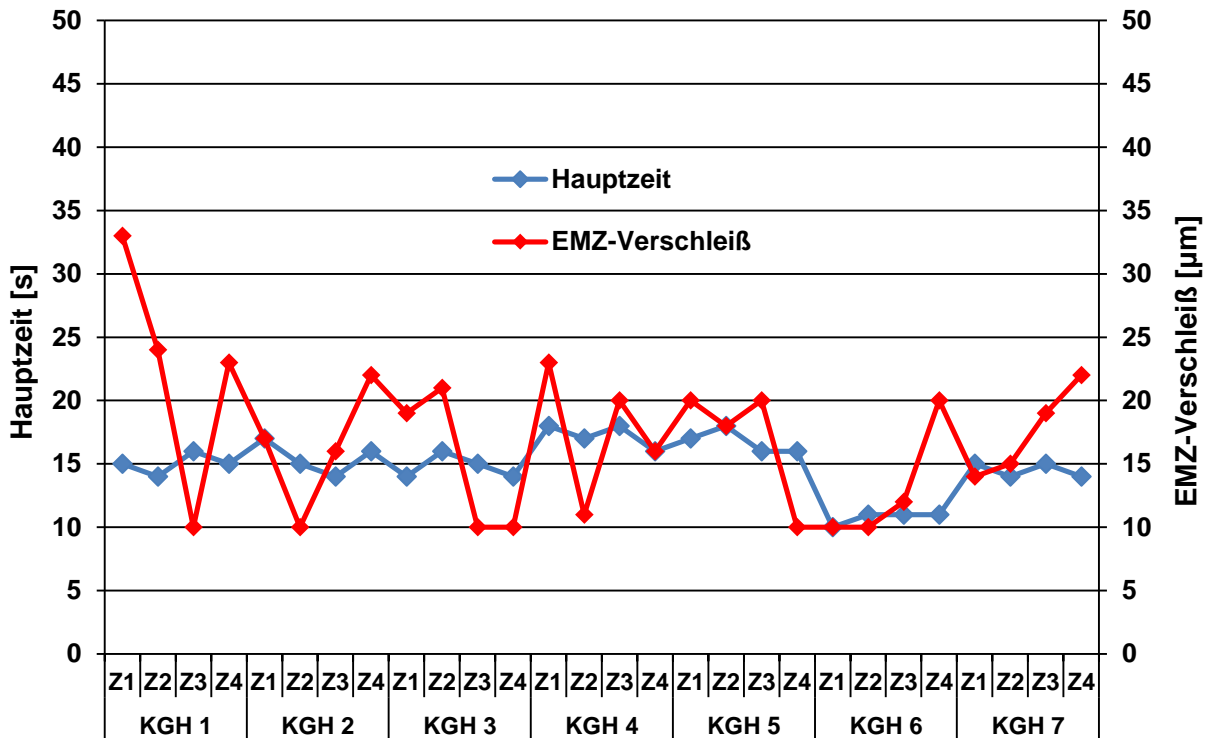


Bild 7.20: Hauptzeit und EMZ-Verschleißkompensation für Honstein SC180\_2

Die in Bild 7.21 dargestellten Kraftverläufe bestätigen die stabilen Hauptzeitverläufe. Es ist ebenfalls ersichtlich, dass  $F_{\text{Start}}$  von 460 N bei diesem Honstein notwendig ist, um schneidfähig sein. Das bestätigt auch der leicht fallende bzw. konstante Kraftverlauf (KGH 6 und 7). Es erfolgt kein Kraftanstieg während der Bearbeitung.

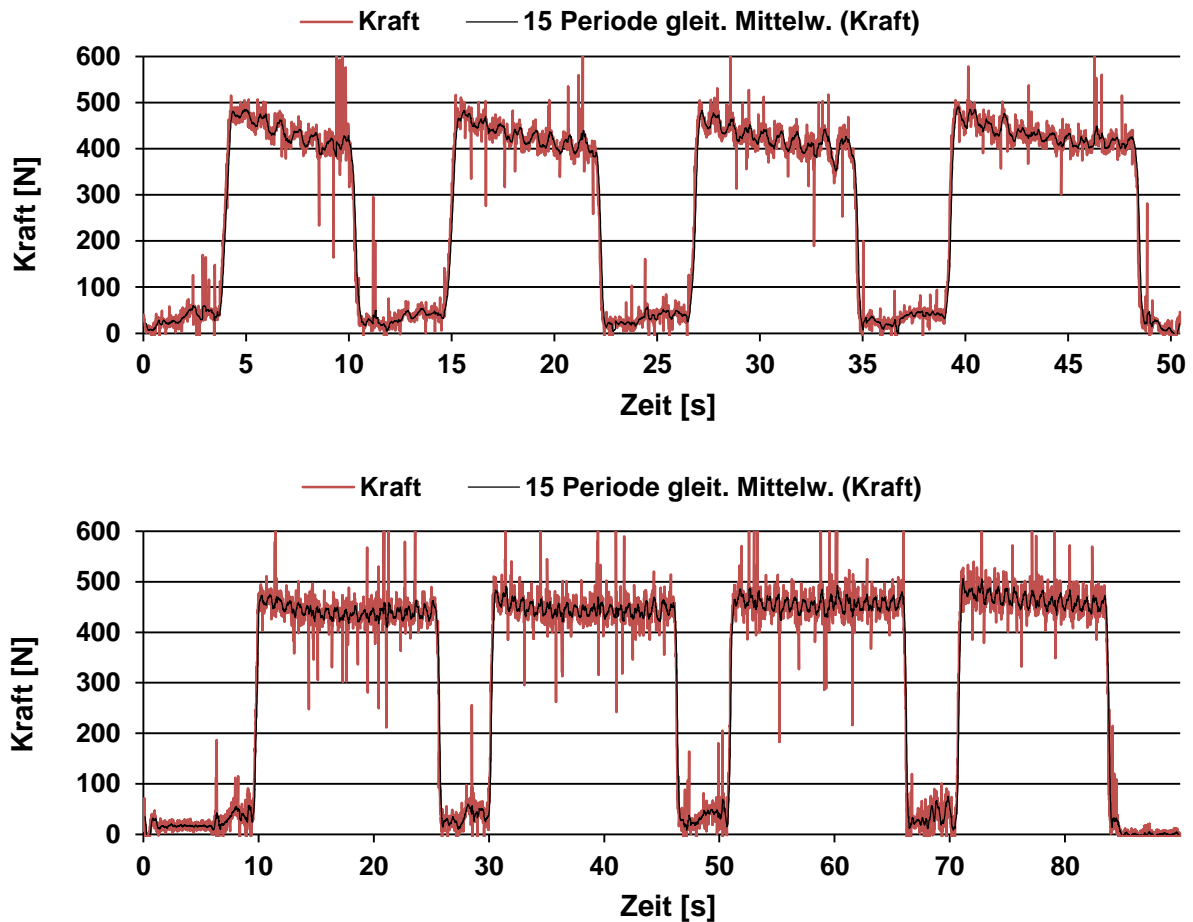


Bild 7.21: Kraftverlauf KGH 6 (oben) und 7 (unten)

In Tabelle 7.7 sind die Ausgangsgrößen für den Honstein SC180\_2 zusammengefasst:

Tabelle 7.7: Ausgangsgrößen Endoberfläche; Honsteine SC180\_2/SC500

Ausgangsgrößen Endoberfläche						
	Min	Max	Ø	Soll	$C_{mk}=1,67$	Messequipment
V-Öl-Honen [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	96	111	106	150	-	Hommel T8000
V-Öl-Poren [ $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ]	2,6	173	43	150	-	
Porenlängenanteil [%]	0,22	3,5	1,0	6	-	
Rundheit [ $\mu\text{m}$ ]	2,9	6,5	4,3	10	6	Incometer
Geradheit [ $\mu\text{m}$ ]	1,0	3,9	2,1	10	6	
Parallelität [ $\mu\text{m}$ ]	2,5	11,0	4,9	20	12	
Hauptzeit [s]	10	18	15	30	-	Honmaschine
Hauptzeitstreuung [s]	-	-	8	15	-	Berechnung
Prozesskraft [N]	460	480	470	-	-	Honmaschine
Verschleiß/Bohrung [ $\mu\text{m}$ ]	-	-	4,0	6,5	-	Bügelmessschraube
Standmenge [Bohrungen]			1625	1000	-	Berechnung

Der Honstein SC180\_2 erfüllt ebenfalls die Qualitätsanforderungen hinsichtlich Oberfläche und Form. Durch die höheren Bearbeitungskräfte (460-480 N) ist die Rundheit im Vergleich zu Honstein SC220 um  $1,5 \mu\text{m}$  (Max-Wert) schlechter. Durch die härtere Bindung konnte eine Standmenge von 1625 Bohrungen erzielt werden. Diese ist um ca. 400 Bohrungen höher als bei Honstein SC180\_1. Aufgrund des höheren Kraftniveaus wird der Honstein SC180\_2, im Vergleich zu den Honsteinen SC220 und SC180\_1, als nicht zielführend im Hinblick auf einen Serieneinsatz betrachtet. Daher werden keine Weißlichtinterferometrie-Aufnahmen der Endoberfläche angefertigt.

Für einen finalen Nachweis einer Großserientauglichkeit der Honsteine SC220 und SC180\_1 müssen die Ergebnisse in weiteren Bearbeitungsversuchen mit einer höheren Anzahl an Versuchsbauteilen bestätigt werden. Darüber hinaus können nach Behebung der Problematik der hohen Hauptzeitstreuung statistische Versuche analog Kapitel 6 durchgeführt werden, um den Einfluss der Schneidstoffspezifikation des keramischen Honsteins auf die Zielgrößen zu untersuchen.

## 7.4 Modellbildung für den Glätthonprozess

In diesem Kapitel wird der letzte Prozessschritt, das Glätthonen, näher betrachtet. Das Ziel ist die Ermittlung eines mathematischen Regressionsmodells zwischen den Eingangsgrößen (Maschinenparametern) und den Ausgangsgrößen (Oberflächenkennwerten). Die Prozessführung beim Glätthonprozess ist kraftgesteuert mit Abschaltart Zeit. Folglich werden die Parameter Glättkraft, Glättzeit sowie Tangentialgeschwindigkeit als Eingangsgrößen für eine DoE definiert. Die Ausgangsgrößen bilden die drei Oberflächenkennwerte V-Öl-Honen, V-Öl-Poren und Porenlängenanteil. Der Glätthonstein (SC500) wird bei dieser DoE nicht variiert, es soll lediglich der Einfluss der Maschinenparameter auf die Endoberfläche analysiert werden.

### 7.4.1 Statistische Versuchsplanung (DoE)

Für die DoE wird ein  $2^k$ -vollfaktorieller Versuchsplan mit  $2^3=8$  Einstellungen (Parameterkombinationen) gewählt. Ferner wird dem Versuchsplan ein Zentralpunkt hinzugefügt, um eventuelle quadratische Zusammenhänge im Modell zu identifizieren. In Tabelle 7.8 sind die Eingangsgrößen für die DoE dargestellt.



Tabelle 7.8: Versuchsraum der Eingangsgrößen

Eingangsgrößen	Minimum	Zentralpunkt	Maximum
Glättkraft [N]	200	400	600
Glättzeit [s]	12	16	20
Tangentialgeschw. [m/min]	78	104	130

In dem definierten Versuchsraum ergeben sich die in Tabelle 7.9 dargestellten Parametereinstellungen für die DoE. Neben dem Zentralpunkt (9) wurde der Versuchsplan um eine weitere Einstellung (10) ergänzt, um die Erklärungsrate zu erhöhen.

Tabelle 7.9: Einstellungen der Eingangsgrößen für die DoE

Kurbelgehäuse	Glättkraft [N]	Glättzeit [s]	Tangentialgeschw. [m/min]
1	200	12	78
2	200	12	130
3	600	12	78
4	600	12	130
5	200	20	78
6	200	20	130
7	600	20	78
8	600	20	130
9 (Zentralpunkt)	400	16	104
10 (zusätzliche Einstellung)	600	12	104

Es wird jeweils ein Kurbelgehäuse (4 Bohrungen) mit einer Parametereinstellung bearbeitet. Bei der Auswertung werden jedoch nur die Bohrungen 2, 3 und 4 berücksichtigt. Bohrung 1 stellt jeweils den Übergang zwischen den einzelnen Einstellungen dar und das Schneidverhalten des Glätthonsteins könnte in Bohrung 1 noch durch die vorherige Einstellung beeinflusst sein. Dadurch können die Oberflächenkennwerte verfälscht werden. Die Oberflächenmessung in einer Bohrung erfolgt jeweils auf 6 Messebenen. Bei 3 Bohrungen werden somit 18 Messwerte je Oberflächenkennwert und Parametereinstellung ausgewertet.

### 7.4.2 Auswertung und Modellbildung für den Kennwert V-ÖI-Honen

Tabelle 7.10 kann das reduzierte Modell sowie die Regressionsgleichung für den Kennwert V-ÖI-Honen entnommen werden.

Tabelle 7.10: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für V-ÖI-Honen

#### Zusammenfassung des Modells

**R-Qd(kor)=80,89 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Tangentialgeschwindigkeit	0,009
Glättkraft	0,025
Glättzeit	0,008

#### Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten

$$\begin{aligned} \text{V-ÖI-Honen} = & 135,74 - 0,1965 \cdot \text{Tangentialgeschwindigkeit} \\ & + 0,01907 \cdot \text{Glättkraft} - 1,266 \cdot \text{Glättzeit} \end{aligned}$$

Es sind keine quadratischen Terme und keine Wechselwirkungen in dem Modell enthalten. Die p-Werte für die Faktoren Tangentialgeschwindigkeit, Glättkraft und Glättzeit sind kleiner 0,05 und somit statistisch signifikant. Die Erklärungsrate R-Qd(kor) liegt bei 80,89 % und beschreibt die vorliegende Datenbasis ausreichend gut. In Bild 7.22 ist das Haupteffektdiagramm für den Kennwert V-ÖI-Honen dargestellt. Es ist ersichtlich, dass höhere Tangentialgeschwindigkeiten und Glättzeiten sowie geringere Glättkräfte eine Rauigkeitsreduzierung bewirken (niedrige V-ÖI-Honen-Werte).

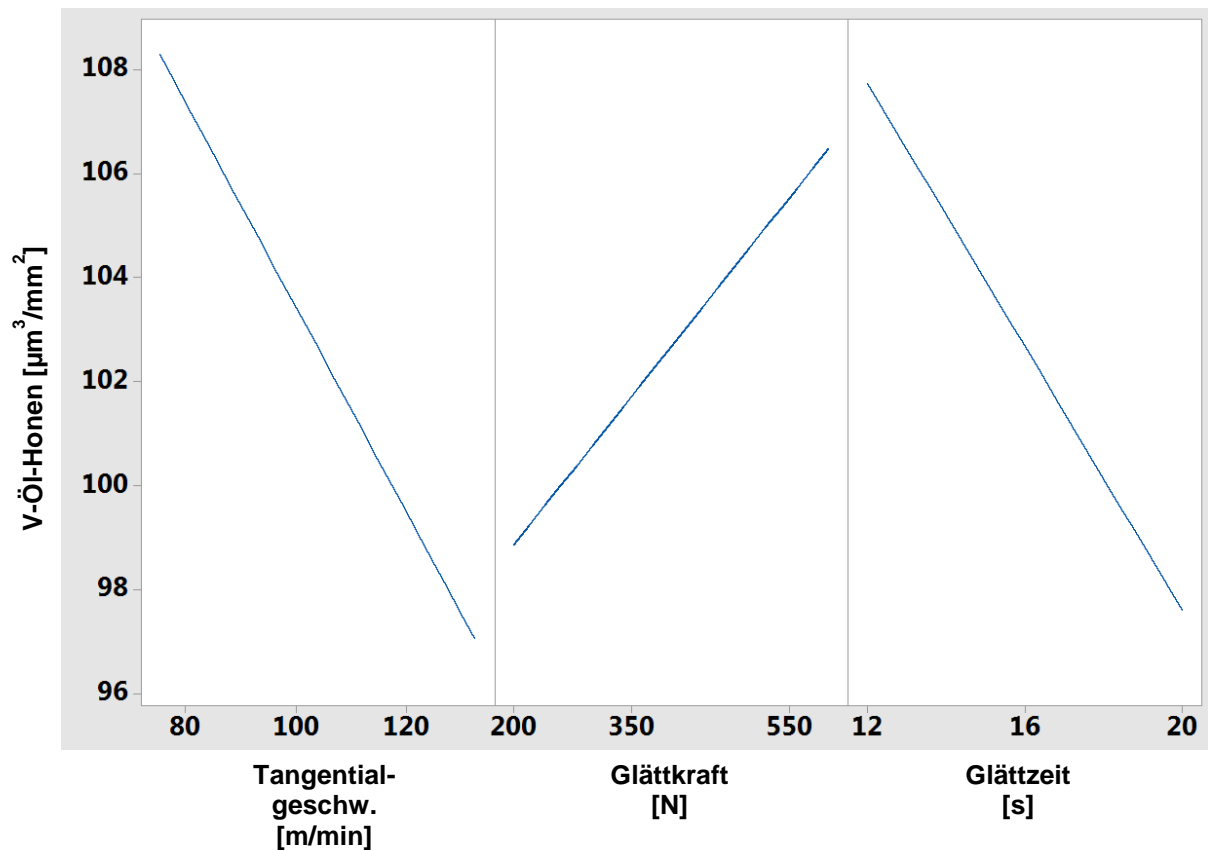


Bild 7.22: Haupteffektdiagramm für V-Öl-Honen

Bei niedrigen Glättkräften dringen die SiC-Schneidkörner weniger tief in die Oberfläche ein. Ferner erfährt der Honstein eine geringere Belastung, so dass die Schneidfähigkeit reduziert wird. Dadurch wird eine feinere Oberfläche erreicht. Hohe Glättzeiten haben ebenfalls eine feinere Oberfläche zur Folge, da sich das Schneidverhalten des Honsteins nach Abtrag der Struktur des Vorprozesses mit zunehmender Bearbeitungszeit verschlechtert. Das feine Schneidkorn und die kraftgesteuerte Prozessführung tragen ebenso ihren Anteil zur Reduzierung der Schneidfähigkeit bei. Hohe Tangentialgeschwindigkeiten führen zu einem niedrigen Spannungsquerschnitt, wodurch die Oberflächenrauigkeit ebenfalls reduziert wird. Die Wirkungsflächendiagramme in Bild 7.23 verdeutlichen das lineare Regressionsmodell für V-Öl-Honen in Abhängigkeit der Eingangsgrößen Tangentialgeschwindigkeit, Glättkraft und Glättzeit.

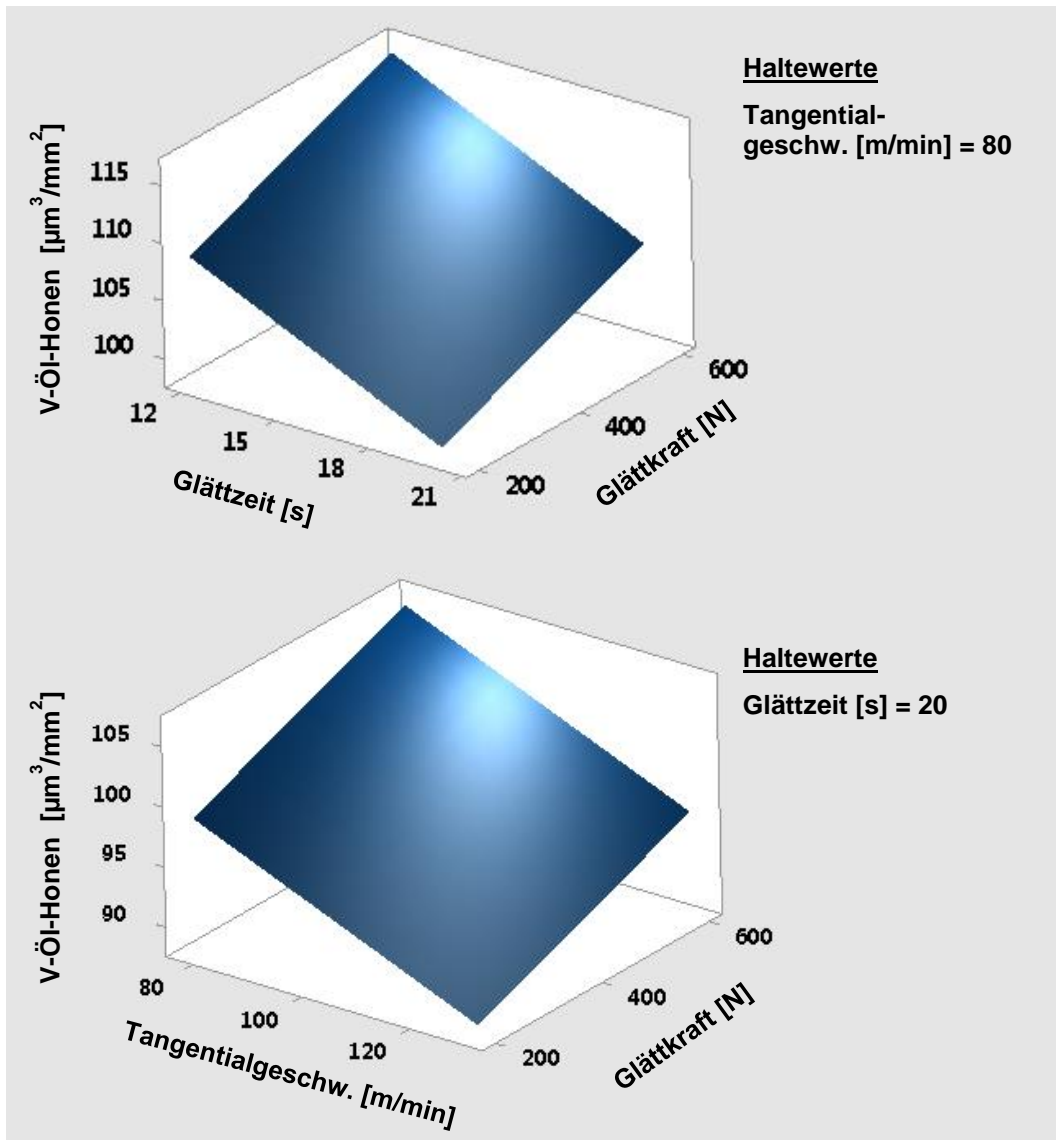


Bild 7.23: Wirkungsflächendiagramm für den Kennwert V-Öl-Honen

Der niedrigste V-Öl-Honen Wert ( $90 \mu\text{m}^3/\text{mm}^2$ ) wird mit folgender Parameterkonfiguration erreicht:

- Glättkraft: 200 N
- Glättzeit: 20 s
- Tangentialgeschwindigkeit: 130 m/min

#### 7.4.3 Auswertung und Modellbildung für den Kennwert V-Öl-Poren

In Tabelle 7.11 ist die statistische Analyse für den Oberflächenkennwert V-Öl-Poren dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die p-Werte für die Eingangsgrößen Tangentialgeschwindigkeit, Glättkraft und Glättzeit größer 0,05 sind und damit statistisch nicht signifikant für die Ausgangsgröße V-Öl-Poren. Folglich ist auch die Erklärungsrate  $R_{Qd(kor)}$  mit 20,10 % sehr gering. Auf der vorliegenden Datenbasis kann also keine

aussagekräftige Regressionsgleichung für den Kennwert V-Öl-Poren aufgestellt werden.

Tabelle 7.11: Auszug aus dem Minitab-Ergebnisprotokoll für V-Öl-Poren

**Zusammenfassung des Modells**

**R-Qd(kor)=20,10 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Tangentialgeschwindigkeit	0,770
Glättkraft	0,064
Glättzeit	0,940

Es lässt sich also keine Korrelation zwischen den Eingangsgrößen und dem Oberflächenkennwert V-Öl-Poren nachweisen. Zum einen ist die Porosität der Schicht durch die Beschichtungsparameter bzw. das Beschichtungsverfahren bestimmt. Zum anderen sind die Poren in der Schicht statistisch zufällig verteilt, d.h. es können sich in der Bohrung jeweils Bereiche mit mehr und weniger Poren ausbilden. Folglich kann bei aktuell 6 Messstrecken je Zylinder die Porosität der Oberfläche nicht ausreichend gut messtechnisch erfasst werden.

#### 7.4.4 Auswertung und Modellbildung für den Kennwert Porenlängenanteil

Tabelle 7.12 kann das reduzierte Modell für den Kennwert Porenlängenanteil entnommen werden.

Tabelle 7.12: Reduziertes Modell mit Regressionsgleichung für Porenlängenanteil

**Zusammenfassung des Modells**

**R-Qd(kor)=89,87 %**

Term	p-Wert
Konstante	0,000
Glättkraft	0,000

**Regressionsgleichung in nicht kodierten Einheiten**

$$\text{Porenlängenanteil} = 4,798 - 0,005590 \cdot \text{Glättkraft}$$

Es konnte ein lineares Regressionsmodell mit dem einzigen Faktor Glättkraft und einer Erklärungsrate von 89,87 % ermittelt werden. Da der Kennwert Porenlängenanteil ebenfalls beschichtungsabhängig ist, wäre ein ähnliches Ergebnis wie bei dem Kennwert V-Öl-Poren plausibel (keine Korrelation). Bei Betrachtung eines Tastschriebs (Bild

7.24) mit hohem Porenlängenanteil ist auffällig, dass die Honstruktur Restriefen des Vorprozesses (Fertighonen) aufweist (ca. 0,5-1  $\mu\text{m}$  tief).

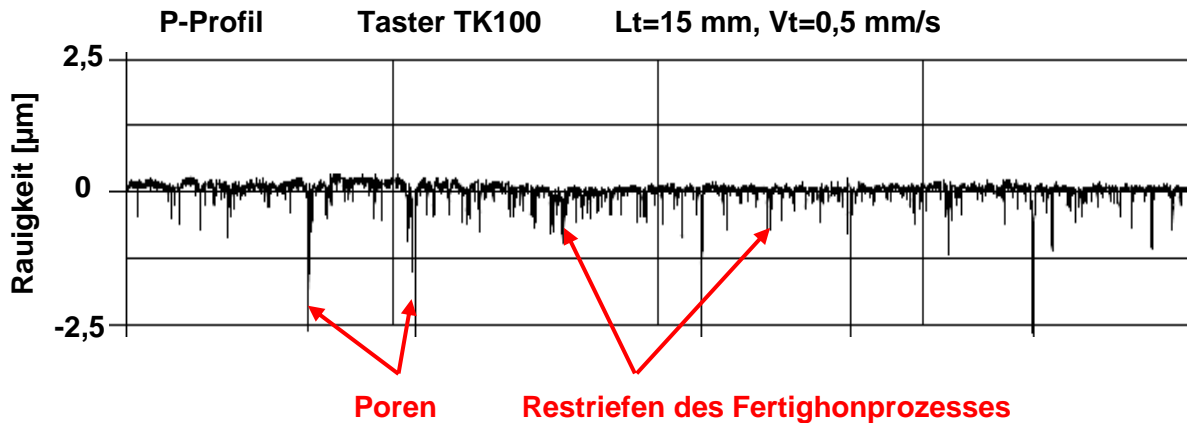


Bild 7.24: Tastschrieb einer Messstrecke mit Porenlängenanteil = 4,94 % (Tangentialgeschw. = 78 m/min; Glättkraft = 200 N; Glättzeit = 20 s)

Die Struktur stellt quasi eine Plateauhonung dar. Die feinen Restriefen werden von dem Mess-Algorithmus fälschlicherweise als Poren detektiert, obwohl es sich um Reststruktur des Fertighonprozesses handelt. Erst bei höheren Glättkräften (600 N) kann die Reststruktur komplett abgetragen werden. Die Folge sind niedrigere Porenlängenanteil-Werte, siehe Bild 7.25.

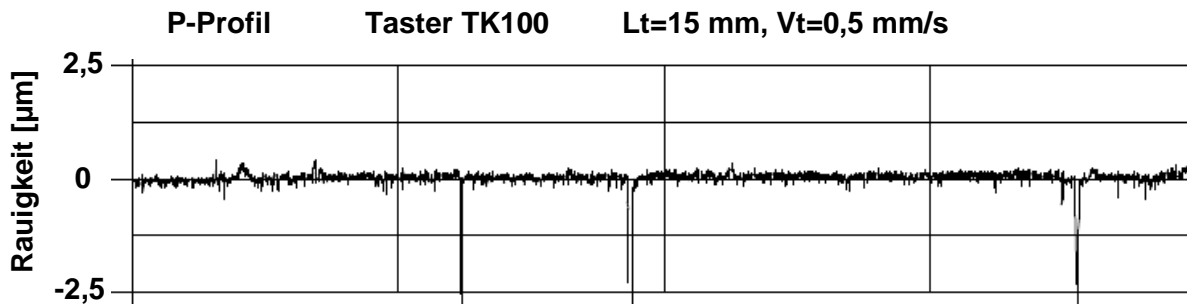


Bild 7.25: Tastschrieb einer Messstrecke mit Porenlängenanteil = 0,95 % (Tangentialgeschw. = 78 m/min; Glättkraft = 600 N; Glättzeit = 12 s)

Es bleibt festzuhalten, dass der Kennwert V-Öl-Honen durch die Eingangsgrößen Tangentialgeschwindigkeit, Glättkraft und Glättzeit in einem Bereich von ca. 25  $\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$  beeinflusst werden kann. Eine Rauigkeitsreduzierung der Oberfläche kann demnach durch höhere Tangentialgeschwindigkeiten und Glättzeiten sowie durch geringere Glättkräfte erreicht werden.

Ein Einfluss der Eingangsgrößen auf den Kennwert V-Öl-Poren konnte nicht identifiziert werden, da die Porosität hauptsächlich durch das Beschichtungsverfahren und die jeweiligen Beschichtungsparameter festgelegt wird. Außerdem kann mit der aktuellen Messvorschrift (6 Messstrecken je Zylinder) keine gesamtheitliche Aussage über die Porosität eines kompletten Zylinders getroffen werden.

Bei dem Kennwert Porenlängenanteil konnten als Einflussgröße die Glättkraft sowie die Reststruktur des Vorprozesses Fertighonen festgestellt werden. Wird die Fertighon-Struktur nicht komplett durch den Glätthonprozess abgetragen, werden die Restriefen der plateauartigen Struktur als Poren detektiert und resultieren in hohen Porenlängenanteil-Werten. Erst bei höheren Glättkräften werden die Restriefen abgetragen und es wird ausschließlich die Struktur des Glätthonprozesses auf der Oberfläche abgebildet.

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass der aktuelle Mess-Algorithmus bei den Kennwerten V-Öl-Poren und Porenlängenanteil Defizite offenlegt und zukünftig weiterentwickelt oder durch andere Messmethoden substituiert werden muss. Bei dem Kennwert V-Öl-Poren beispielsweise könnte die Anzahl der Messstrecken erhöht und auf den gesamten Umfang des Zylinders ausgeweitet werden. Weiterhin sind zur gesamtheitlichen Bestimmung der Porosität Kamerasysteme denkbar, die es ermöglichen, den kompletten Zylinder messtechnisch zu erfassen. Den Kennwert Porenlängenanteil betreffend sollte der Algorithmus dahingehend optimiert werden, dass auch die Erfassung plateauartiger Strukturen möglich ist.

## 7.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Siliziumkarbidhonung

In diesem Abschnitt wird die Siliziumkarbid- und die Diamanthonung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet und gegenübergestellt. Die Bewertung erfolgt dabei über die laufenden Fertigungskosten je Bohrung. Aus Gründen der Geheimhaltung werden an dieser Stelle nur prozentuale Zahlen angegeben.

Die Fertigungskosten je Bohrung  $FK_B$  [€] setzen sich aus den Schneidstoffkosten  $K_S$  [€] und den Werkzeugaufbereitungskosten  $K_{WA}$  [€] zusammen, bezogen auf die Standmenge  $SM$  [Bohrungen], siehe Formel 7.1.

$$FK_B = \frac{K_S + K_{WA}}{SM} \quad (7.1)$$

Die Schneidstoffkosten der SiC-Honsteine betragen ca. 10 % der Kosten für Diamanthonsteine. Die Werkzeugaufbereitungskosten eines SiC-Werkzeugs können mit 17 % der Kosten eines Diamant-Werkzeugs angesetzt werden, siehe Bild 7.26 (Basis: Diamant-Werkzeug mit 100 %).

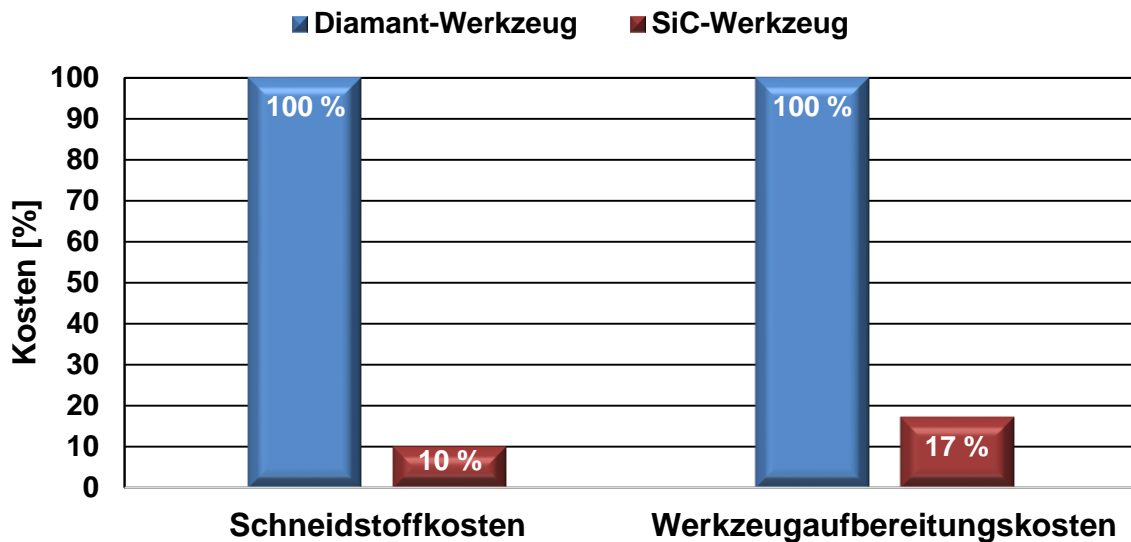


Bild 7.26: Prozentuale Kosten für Diamant- und SiC-Werkzeug

Tabelle 7.13 veranschaulicht die einzelnen Arbeitsschritte bei der Werkzeugaufbereitung der jeweiligen Werkzeugausführung. Es ist ersichtlich, dass die kosten-treibenden Arbeitsschritte Thermisches Fügen, Rundschleifen und Sandstrahlen bei der Aufbereitung eines SiC-Werkzeugs entfallen.

Tabelle 7.13: Arbeitsschritte bei der Werkzeugaufbereitung

Diamant-Werkzeug	SiC-Werkzeug
1. Demontage und Reinigung	1. Demontage und Reinigung
2. Thermisches Fügen (Löten)	2. Fügen durch Kaltkleben
3. Komplettmontage	3. Komplettmontage
4. Rundschleifen + Demontage	4. Honwerkzeug prüfen
5. Sandstrahlen + Reinigen	
6. Montage	
7. Honwerkzeug prüfen	



Bild 7.27 stellt die prozentualen Fertigungskosten je Bohrung der beiden Werkzeugvarianten dar. Die Basis mit 100 % bilden auch hier die Kosten für das Diamant-Werkzeug. Dabei wird bei dem Diamant-Werkzeug die Standmenge von 3000 Bohrungen aus der aktuellen Serienfertigung angesetzt. Die Fertigungskosten des SiC-Werkzeugs werden mit dem Mittelwert der Standmengen (1200 Bohrungen) aus den Versuchen zur Honstein-Qualifizierung berechnet (Kapitel 7.3).

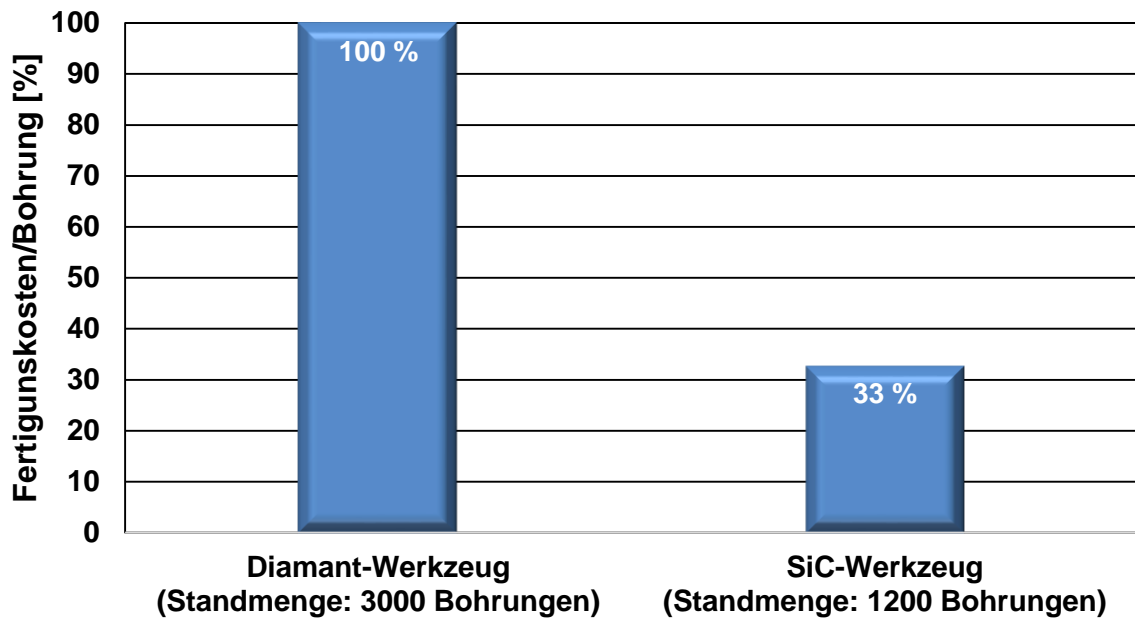


Bild 7.27: Prozentuale Fertigungskosten/Bohrung für Diamant- und SiC-Werkzeug

Aus der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird deutlich, dass die Fertigungskosten je Bohrung des SiC-Werkzeugs 1/3 der Kosten des Diamant-Werkzeugs betragen. Die Siliziumkarbidbohrung ist somit wirtschaftlicher als die Diamanthonung.

## 8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Modellbildung und Simulation von thermisch beschichteten Zylinderlaufbahnen. Nach einer grundlegenden Einführung in die Hontechnologie werden die existierenden Ansätze zur Modellierung und Simulation von Hon- und Schleifverfahren diskutiert. Dabei zeigt sich, dass die vorhandenen Ansätze aufgrund der Komplexität nur bedingt in der Praxis Anwendung finden. Weiterhin wird bei den Modellansätzen für Honprozesse ausschließlich Grauguss als Werkstoff verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Ursache-Wirkungszusammenhänge beim Honen einer thermischen Spritzschicht unter Anwendung von unterschiedlichen Methoden der Modellbildung untersucht.

In einem ersten Schritt werden mit Hilfe der Methode der finiten Elemente die durch die Normalkräfte resultierenden elastischen Zylinderverformungen berechnet. Die Simulationsergebnisse zeigen eine deutliche Korrelation zwischen Verformung, Wandstärke und Formmessung. Höhere Verformungen sind jeweils an Stellen mit geringerer Steifigkeit zu beobachten. Mit dem erarbeiteten Werkzeug- und Honprozessmodell können für zukünftige Motorengenerationen kritischen Bereiche im Kurbelgehäuse schon früh in der digitalen Entwicklungsphase identifiziert werden. Auf Basis der Berechnungsergebnisse können konstruktive Maßnahmen eingeleitet werden, um das Kurbelgehäuse zu versteifen und damit die Verformungen und Rundheitsabweichungen zu reduzieren. Weiterhin können prozessseitig die Bearbeitungskräfte bzw. Zustellgeschwindigkeiten begrenzt werden, um die Anforderungen hinsichtlich Zylinderform zu erfüllen. Darüber hinaus können auf Basis der Ergebnisse Bearbeitungszeiten abgeleitet werden, welche in die Investitionsplanung einer Fertigungslinie einfließen können.

In einem weiteren Schritt wird für den Schneidstoff Diamant der Einfluss der Eingangsgrößen (Maschinenparameter und Schneidstoffzusammensetzung) auf die Ausgangsgrößen analysiert (Prozesskräfte und Oberflächenrauigkeit). Hierfür werden zunächst die jeweiligen Prozessdaten der Maschine mit den entsprechenden Kraftkomponenten kalibriert. Es kann eine Korrelation zwischen dem direkten Spindelmoment und dem

Drehmoment der Kraftmessplattform nachgewiesen werden. Über eine spezielle Vorrichtung erfolgt eine Kalibrierung der Normalkraft über das Aufweitemoment des Zustellmotors. Eine Kalibrierung der Axialkraft über das Hubmoment ist nicht möglich, da bereits für die Hubbewegung ein hohes Moment erforderlich ist, so dass Änderungen der Axialkraft nicht erfasst werden können. Weiterhin wird eine Korrelation zwischen dem Kraftverhältnis  $F_{ca}/F_{ct}$  und dem Geschwindigkeitsverhältnis  $v_{ca}/v_{ct}$  nachgewiesen, so dass die Axialkraft über die Tangentialkraft bestimmt werden kann. Somit können zukünftig alle Bearbeitungskräfte über die kalibrierten steuerungsinternen Daten erfasst werden. Die Korrelation der physikalischen Messgrößen mit den internen Prozessdaten der Honmaschine bildet die Grundlage für die Entwicklung komplexer Regelungsstrategien für Honprozesse, um eine vollständige Überprüfung der Zielgrößen auf Basis der Bearbeitungskräfte zu ermöglichen. Aus den ermittelten Regressionsmodellen geht hervor, dass höhere Tangentialgeschwindigkeiten (Drehzahlen) niedrigere Bearbeitungskräfte zur Folge haben. Bei der Variation der Schneidstoffspezifikation konnte festgestellt werden, dass durch Bindungssysteme mit verbesserter Selbstschärfung (Füllstoffanteil in der Bindung) die Bearbeitungskräfte ebenfalls reduziert werden. Dies ist vorteilhaft, da insbesondere höhere Normalkräfte zu Formabweichungen führen. Eine deutliche Herabsetzung der Oberflächenrauigkeit konnte nur durch eine hohe Kornkonzentration erreicht werden.

Ein weiterer Fokus der Arbeit liegt auf der erstmaligen Bearbeitung einer thermischen Spritzschicht mit Siliziumkarbid in keramischer Bindung. Primäres Ziel dieser Schneidstoffsubstitution ist die Erhöhung der Oberflächengüte der Zylinderlaufbahn. Dabei wird zunächst die charakteristische Hauptzeitstreuung im Fertighonprozess durch die Analyse der Kraftverläufe und der anschließenden Integration geeigneter Maschinenparameter deutlich reduziert. Es kann festgehalten werden, dass ein SiC-Honstein eine Mindest-Normalkraft bei Prozessstart benötigt, um schneidfähig zu sein. Zwei Fertighonsteine konnten bei den durchgeführten Versuchsreihen als zielführend hinsichtlich der Zielgrößen eingestuft werden. Die Ergebnisse müssen jedoch im Hinblick auf einen Großserieneinsatz in weiteren Bearbeitungsversuchen mit einer höheren Anzahl an Versuchsbauteilen bestätigt werden. Des Weiteren können nach Behebung der Problematik der hohen Hauptzeitstreuung im Fertighonprozess Korrelationen zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen durch statistische Versuche ermittelt werden. Aus den Weißlichtinterferometer-Aufnahmen der endbearbeiteten Oberfläche

wird der qualitative Vorteil der Siliziumkarbidhonung deutlich. Die SiC-Honung erzeugt ein gleichmäßigeres Schnittbild als die Diamanthonung. Darüber hinaus werden durch die SiC-Honung mehr Poren freigeschnitten, die in ihren Randbereichen abgerundet sind, so dass ein geringerer Verschleiß am Kolbenring zu erwarten ist. In einem weiteren Schritt werden für die Kennwerte der Endoberfläche Regressionsmodelle erstellt. Demnach kann der Rauigkeitskennwert V-ÖI-Honen durch eine Erhöhung von Tangentialgeschwindigkeit und Glättzeit sowie durch eine Absenkung der Glättkraft reduziert werden. Für den Oberflächenkennwert V-ÖI-Poren kann keine Modellgleichung aufgestellt werden, da die Poren in der Schicht statistisch zufällig verteilt sind. Der Kennwert Porenlängenanteil ist laut Modell ausschließlich von der Kraft abhängig. Eine Reduzierung dieses Kennwertes kann durch hohe Kräfte erreicht werden. Bei der Analyse der Tastschriebe ist jedoch erkennbar, dass feine Restriefen vom Auswertungs-Algorithmus fälschlicherweise als Poren erkannt werden. Die Notwendigkeit einer Weiterentwicklung bzw. Substituierung des aktuellen Mess-Algorithmus durch andere Messsysteme wurde aufgezeigt. Aus der abschließenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung geht hervor, dass die Siliziumkarbidhonung wirtschaftlicher ist als die Diamanthonung.

## 9 Literaturverzeichnis

- [Arde00] Ardelt, T.: Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2000
- [Barb01] Barbezat, G.; Schmid, J.: Plasmabeschichtungen von Zylinderkurbelgehäusen und ihre Bearbeitung durch Honen, in "Motortechnische Zeitschrift" (MTZ 62), Nr. 4, 2001, S. 314-320
- [Berg90] Bergen, K.-H.: Langhub-Innenrundhonen von Grauguss und Stahl mit einem elektromechanischen Vorschubsystem, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1990
- [Bier14] Biermann, D.; Joliet, R.; Kansteiner, M.: Experimentelle und simulative Untersuchung des Langhubhonnens, Diamant Hochleistungswerkzeuge (dihw) Magazin, Ausgabe 1 (S. 30-36), Ausgabe 2 (S. 38-41), 2014
- [Bobz08] Bobzin, K. et al.: Coating Bores of Light Metal Engine Blocks with a Nanocomposite Material using the Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spray Process, in "Journal of Thermal Spray Technology 17", Nr. 3, 2008, S. 344-350
- [Böhm12] Böhm, J.; Michel, M.; Behr, T.; Hahn, M.; Schweickert, S.: NANOSLIDE® - Die Weiterführung der konsequenten Optimierung von Zylinderlaufbahnen bei Mercedes Benz, 6. VDI-Fachtagung mit Fachausstellung (VDI-Berichte 2163), 2012
- [Brin06] Brinksmeier, E. et al.: Advances in Modeling and Simulation of Grinding Processes, Annals of the CIRP, Vol. 55/2, 2006

- [Daim14] Daimler AG: Thermisch beschichtetes Bauteil mit einer reibungsoptimierten Laufbahnoberfläche und Verfahren zur Bauteil-Beschichtungsoberflächensimulation eines thermisch beschichteten Bauteils, Patentschrift DE 10 2012 002 766 B4, Erfinder: Böhm, J. et al, 2014
- [Daim15] Daimler AG: Thermisch beschichtetes Bauteil, Patentschrift WO2015161909 A1, Erfinder: Behr, T. et al, 2015
- [DIN05a] DIN 69186: 1983-05, Honsteine, 2005
- [DIN05b] DIN EN 657: Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung, 2005
- [DIN09] DIN 8589-14:2003-09, Fertigungsverfahren Spanen - Teil 14: Honen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [Dros12] Drossel, W.; Hochmuth, C.; Treppe, F.; Schneider, R.: Adaptronisches Formhonen - Fertigungsverfahren zur Kompensation von Zylinderverzügen, Kolloquium Ressourceneffiziente Technologien für den Powertrain, Chemnitz, 2012
- [Dröd18] Dröder, K.; Hoffmeister, H.-W.; Große, T.: Force-controlled form honing using a piezo-hydraulic form honing system, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Volume 66/1, pages 317-320
- [Fahr14] Fahrenwaldt, H.; Schuler, V.; Twrdek, J.: Praxiswissen Schweißtechnik – Werkstoffe, Prozesse, Fertigung, Springer Vieweg-Verlag Wiesbaden, 2014, S. 209-239
- [Flor92] Flores, G.: Grundlagen und Anwendungen des Honens, Vulkanverlag Essen, 1992
- [Flor07] Flores, G.; Abeln, T.; Klink, U.: Funktionsgerechte Endbearbeitung von Zylinderbohrungen aus Gusseisen, in "Motortechnische Zeitschrift", Nr. 3, 2007, S. 181-185
- [Flor10a] Flores, G.: Feinbearbeitung von Bohrungen, Skript Hochschule Esslingen, 2010, S. 10-12

- [Flor10b] Flores, G.: Gebundene Schneidstoffe, Skript Hochschule Esslingen, 2010, S. 1
- [Frit08] Fritz, A.-H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. 8, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2008, S. 340, 341, 344, 345
- [Gand11] Gand, B.: Beschichtung von Zylinderlaufflächen in Aluminium-Kurbelgehäusen, in "Motortechnische Zeitschrift" (MTZ 72), Nr. 2, 2011, S. 128-131
- [Haas55] Haasis, G.: Untersuchungen über wirtschaftliches Honen, Dissertation, Universität Stuttgart, 1955
- [Heri06] Hering, E.; Martin, R.: Photonik - Grundlagen, Technologie und Anwendung, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2006, S. 243-245
- [Hoff14] Hoffmeister, H.-W.; Dröder, K.; Große, T.; Fricke, A.; Schweig, F.: Neue Ansätze und Leistungspotenziale für das Bohrungshonen, Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, 10. Seminar, Stuttgart, 2014
- [Hube08] Huber, A.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, VDI-Buch 8. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008
- [Karp12] Karpuschewski, B.; Pieper, H.-J.; Welzel, F.; Risse, K.: Alternative strategies in finishing cylinder running surfaces, Annals of the CIRP 61, 2012, p. 559-562
- [Karp15] Karpuschewski, B.; Schweickert, S.; Kreter, S.: Simulation of cylinder deformations during honing of thermally coated running surfaces in crankcases, Applied Mechanics and Materials, Volume 794, 2015, S. 247-254
- [Karp16] Karpuschewski, B.; Schweickert, S.; Kreter, S.: Analyse der Prozesskräfte beim Honen von thermisch beschichteten Zylinderlaufbahnen, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren 67, 2016, S. 216-231

- [Kess53] Kessler, G.: Honen von Bohrungen, Dissertation, TH Stuttgart, 1953
- [Klei07] Klein, B.: Versuchsplanung - DoE: Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik. Oldenbourg Verlag München, 2007, S. 141-150
- [Klep09] Kleppmann, W.: Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren, Hanser Verlag München, 2009, S. 10-12
- [Kloc05] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren - Schleifen, Honen, Läppen, Springer Verlag Berlin, 2005, S.343, 346, 353
- [Köhl09] Köhler, E. et al.: Leichtbau beim Zylinderkurbelgehäuse für aktuelle und zukünftige Anforderungen, in "Motortechnische Zeitschrift" (MTZ 70), Nr. 10, 2009, S. 712-721
- [Köni82] König, W.; Steffens, K.: A Numerical Method to Describe the Kinematics of Grinding, Annals of the CIRP 31/1, 1982, p. 201-204
- [Mahl09] Mahle GmbH (Hrsg.): Zylinderkomponenten: Eigenschaften, Anwendungen, Werkstoffe, Vieweg+Teubner Verlag, GWV Fachverlage GmbH, 2009. S. 97, 99, 113
- [Merc09] Mercedes-Benz Technische Norm (MBN 31007-10), Normgruppe 31: Geometrische Produktspezifikationen (GBS), Oberflächenbeschaffenheit - Strukturtrennung von Profilen, 2009
- [Mush86] Mushardt, H.: Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1986
- [Niss09] Nissan Motor Co., Ltd.: Surface roughening methods using cutting tools, Patent No.: US 7,607,209 B2, United States Patent, Erfinder: Iizumi, M.; Nishimura, K., 2009
- [Opti64] Optiz, H.; Peklenik, J.; Ernst, W.: Untersuchung der Härte von Schleifkörpern, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen, 1964
- [Pauc08] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.: Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 2008, S. 368-375



- [Plas95] Plass, M.: Analyse der abtrags- und formbeeinflussenden Prozessparameter beim Honen mit einem neuartigen Inprozess-Messsystem, in "Qualität in der Fertigung - Honen in Forschung und industrieller Anwendung", 3. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1995
- [Riss12] Risse, A.: Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2012, S. 191
- [Sche97] Scheffler, E.: Statistische Versuchsplanung und –auswertung - Eine Einführung für Praktiker, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1997
- [SchJ04] Schmidt, J.; Schmidt, C.; Mehr, A.: Simulation von Formhonorprozessen, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 61. Ausgabe, Vulkan Verlag Essen, 2004
- [Schm15] Schmitt, C.: Analyse und Modellbildung von Kräften beim Präzisionshonen von Bohrungen, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2015
- [Scho13] Schommers J.; Scheib, H.; Hartweg, M.; Bosler, A.: Reibungsminimierung bei Verbrennungsmotoren, in "Motortechnische Zeitschrift" (MTZ 74), Nr. 07, 2013, S. 566-573
- [Schw14] Schweig, F.; Ziegele, H.; Spitznagel, T.; Dröder, K.; Hoffmeister, H.-W.; Große, T.; Wiens, A.; Flores, G.: Prozessoptimierung beim Formhonen mittels Kraftmessuntersuchungen, VDI-Berichte 2230, 2014, S. 221-238
- [Schö02] Schönherr, H.: Spanende Fertigung, Oldenbourg Verlag Deutschland, 2002, S. 439-441
- [Sieb10] Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments, Springer Verlag Heidelberg, 2010, S. 3, 12, 15

- [Sieg95] Siegmann, S.: Thermisch gespritzte Schichten: Charakterisierungen und Applikationen, in Seminar "Angewandte Oberflächenanalytik", Dübendorf (CH), 1995
- [Stef83] Steffens, K.; König, W.: Closed loop simulation of grinding, Annals of the CIRP, 32/1, 1983, p. 255-258.
- [Töns70] Tönshoff, T.: Formgenauigkeit, Oberflächenrauheit und Werkstoffabtrag beim Langhubhonen, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1970
- [vSee89] von See, M.: Optimierung von Honprozessen auf der Basis von Modellversuchen und -betrachtungen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1989
- [Welz14] Welzel, F.: Tribologische Optimierung von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren aus fertigungstechnischer Sicht, Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2014
- [Wenz15] Wenzel, M.: Implementierung eines neuen Messsystems zur Beurteilung von Oberflächenstrukturen des mechanischen Aufrauens, Masterarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2015
- [Wern11] Werner, P.; Schommers, J.; Breitbach, H.; Spengel, C.: Der neue V6-Dieselmotor von Mercedes Benz, in "Motortechnische Zeitschrift" (MTZ 72), Nr. 05, 2011, S. 366-373
- [Weul88] Weule, H., (submitted by Eversheim): Improved Honing through Process Control, Annals of the CIRP, Band 37, Nummer 1, 1988
- [Wiec55] Wieck, K.: Außenfeinhonen, Schriftenreihe Feinbearbeitung, Deutscher Fachzeitschriften- und Fachbuch Verlag GmbH Stuttgart, 1955
- [Wien11] Wiens, A.: Formhonen von Zylinderlaufbahnen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2011

- [Yama78a] Yamamoto, A.; Ueda, T.: Action of Sulfur in Treated Honing Sticks, Contribution to Finishing Performance Through Reinforcing Acting Grits, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 12, No 4, 1978
- [Yama78b] Yamamoto, A.; Ueda, T.: Action of Sulfur in Treated Honing Sticks, Reinforcement of Acting Grit and Restraint of Loading, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 12, No 4, 1978
- [Yama79] Yamamoto, A.; Ueda, T.: Improvement of Treated Honing Sticks Performance by Adding Solid Lubricant, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 13, No 4, 1979
- [Zett74] Zettel, H.-D.: Abtragssteigerung und Formverbesserung beim Langhubhonen, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1974
- [Zurr90] Zurrin, R.: Variables Formhonen durch rechnergestützte Honprozesssteuerung, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1990