

**Analyse und Modellbildung von Kräften beim
Präzisionshonen von Bohrungen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät III
Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften
der Universität des Saarlandes

von

Christina Schmitt

Saarbrücken, 2015

Tag des Kolloquiums: 06.07.2015
Dekan: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Vorsitz: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Ralf Busch
Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. Joachim Schmitt

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einem Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, dem Langhub-Innenrundhonen, das zur Bearbeitung von Bohrungen verwendet wird. Das Honen dient dabei der Erzeugung einer hohen Form-, Maß- und Oberflächengenauigkeit bei vorbearbeiteten Werkstücken und ist in der Regel der letzte Schritt in der Prozesskette. Betrachtet werden zunächst grundlegende Effekte beim Honen sowie Möglichkeiten zur optimierten Prozessführung durch eine Modellierung der Kräfte. Eingegangen wird dabei auf das weggeführte Honen, das in der Industrie derzeit weit verbreitet ist und eine Zustellung der Honleiste in festen Schritten zu festgelegten Zeitpunkten durchführt. Daneben wird auch die alternative Möglichkeit des kraftgeführten Honens vorgestellt. Dieses versucht während der gesamten Prozesszeit eine konstante Kraft zu erreichen und damit eine höhere Präzision und Wiederholgenauigkeit zu gewährleisten. Da die Kraft aber im Moment, insbesondere beim Honen von Präzisionsbohrungen mit einem Durchmesser unter 20mm, nur indirekt gemessen werden kann, ist sie fehlerbehaftet. Eine Modellierung der Kraftverhältnisse am Werkzeug soll hier Abhilfe schaffen. Dazu werden verschiedene Ansätze vorgestellt und auf ihre Eignung hin überprüft. Notwendige Modellparameter werden ermittelt, dann werden berechnete Verläufe mit gemessenen verglichen. Im Anschluss werden Anwendungsmöglichkeiten für die Modelle aufgezeigt.

Abstract

This thesis deals with long-stroke internal honing – a manufacturing process with geometrically undefined cutting edge used for the machining of bores. Honing serves to generate high form-, dimension- and surface accuracy in pre-machined work pieces and constitutes generally the last step in the process chain. At first, basic effects during the honing process as well as possibilities for the optimized process control by modelling the forces are examined. In doing so, the author goes into the stroke-controlled honing which is at the moment widespread in the industry and which conducts a feed of the honing stone in fixed steps and at given points in time. In addition, also the alternative possibility of force-controlled honing is presented which tries to reach a constant force during the entire process time and to ensure with it a higher precision and repeatability. As it is at the moment only possible to indirectly measure the force, especially with regard to the honing of precision bores with a diameter below 20mm, it is subject to errors. A modelling of the force distributions at the tool is to find a remedy. For this purpose, different approaches are presented and their suitability is verified. Necessary model parameters are determined, and then calculated processes are compared with measured ones. Afterwards, possible applications for the models are shown.

INHALTSVERZEICHNIS

SYMBOLVERZEICHNIS	VI
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IX
1 EINLEITUNG UND MOTIVATION.....	1
2 LANGHUB-INNENRUNDHONEN VON BOHRUNGEN	4
2.1 GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG DES HONVERFAHRENS.....	4
2.2 DAS HONVERFAHREN.....	6
2.2.1 <i>Grundlagen</i>	6
2.2.2 <i>System</i>	11
2.2.3 <i>Werkstück</i>	15
2.2.4 <i>Werkzeug</i>	16
2.2.5 <i>Parameter</i>	21
2.3 UNTERSUCHUNGEN UND MODELLE ZUM BOHRUNGSHONEN	24
3 KONZEPT UND FRAGESTELLUNG.....	28
4 VERSUCHSMETHODEN	31
4.1 HONVERSUCHE.....	31
4.1.1 <i>Übersicht zur Versuchsdurchführung</i>	31
4.1.2 <i>Honmaschine</i>	32
4.1.3 <i>Messtechnik</i>	34
4.1.4 <i>Prozessbedingungen</i>	35
4.1.5 <i>Prozessführung</i>	37
4.2 ANALYSE VON WERKZEUG UND WERKSTÜCK	38
4.2.1 <i>Oberflächenmessung</i>	38
4.2.2 <i>Formmessung</i>	39
4.2.3 <i>Mikroskopie</i>	40
4.3 ERMITTLUNG VON TANGENTIALKRAFTKOEFFIZIENTEN.....	40
4.3.1 <i>Versuchsstand</i>	40
4.3.2 <i>Messtechnik</i>	42
4.3.3 <i>Bedingungen und Ablauf</i>	42

5	UNTERSUCHUNGEN ZUM HONPROZESS	44
5.1	DER HONPROZESS	44
5.2	WEG- UND KRAFTGEFÜHRTES HONEN.....	48
5.3	EINFLUSS VERSCHIEDENER PARAMETER AUF DEN HONPROZESS	55
5.4	KRÄFTEVERHÄLTNISSE AM WERKZEUGUMFANG	57
5.5	BESTIMMUNG VON MODELLPARAMETERN	59
6	EIGNUNG VERSCHIEDENER MODELLE ZUR BESCHREIBUNG DER KRÄFTEVERHÄLTNISSE AN DER HONLEISTE	63
6.1	GEOMETRISCHES BASISMODELL	63
6.1.1	<i>Erstellung des Modells.....</i>	<i>63</i>
6.1.2	<i>Experimentelle Überprüfung.....</i>	<i>64</i>
6.1.3	<i>Einfluss der Modellparameter.....</i>	<i>65</i>
6.2	MODELL MIT BERÜCKSICHTIGUNG VON REIBKRÄFTEN	66
6.2.1	<i>Herleitung des Modells.....</i>	<i>66</i>
6.2.2	<i>Experimentelle Validierung des Modells</i>	<i>68</i>
6.2.3	<i>Einfluss der Modellparameter.....</i>	<i>72</i>
6.3	MODELL UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON MASSEKRÄFTEN	74
6.3.1	<i>Phaseneinteilung des Honprozesses.....</i>	<i>74</i>
6.3.2	<i>Kräfteverhältnisse an der Honleiste</i>	<i>76</i>
6.3.3	<i>Experimentelle Validierung.....</i>	<i>80</i>
6.3.4	<i>Einfluss der Modellparameter.....</i>	<i>82</i>
7	ANSÄTZE ZUR MODELLBASIERTEN PROZESSOPTIMIERUNG	86
7.1	BELASTUNGEN AN HON- UND STÜTZLEISTEN	86
7.2	ANSÄTZE ZUR MODELLBASIERTEN PROZESSREGELUNG	91
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	94
	LITERATURVERZEICHNIS	96

SYMBOLVERZEICHNIS

Kurzzeichen	Einheit	Bezeichnung
a, b, c, d, e	-	Hilfsgrößen
a_H	mm/s ²	Hubbeschleunigung
A_h	mm ²	Honleistenoberfläche
b_h	Mm	Honleitenbreite
D	Mm	Werkstückdurchmesser nach dem Honvorgang
F_1	N	Hilfskraft
F_a	N	Auflagerkraft
F_{a1}, F_{a2}	N	Reibkräfte am Werkzeug
F_{ha}	N	Axiale Kraft an der Honleiste
F_{hr}	N	Radiale Kraft an der Honleiste
F_{ht}	N	Tangentiale Kraft an der Honleiste
F_k	N	Konuskraft
F_n	N	Normalkraft
F_{s1r}	N	Radiale Kraft an der Führungsleiste 1
F_{s1t}	N	Tangentiale Kraft an der Führungsleiste 1
F_{s2r}	N	Radiale Kraft an der Führungsleiste 2
F_{s2t}	N	Tangentiale Kraft an der Führungsleiste 2
F_{sr}	N	Radiale Kraft an der Führungsleiste
F_{st}	N	Tangentiale Kraft an der Führungsleiste
F_t	N	Tangentialkraft
$F_{x,y}$	N	Querkräfte
F_z	N	Axialkraft
G	-	Schleifverhältnis
G_h, G_k	N	Gewichtskräfte von Honleiste und Zustelleinheit
h	mm	Hubposition
HRC	-	Rockwell-Härte, Verfahren nach Skala C
l_B	mm	Bohrungslänge
l_H	mm	Hublänge
l_h	mm	Honleistenlänge
l_o	mm	Oberer Überlauf
l_u	mm	Unterer Überlauf

m	-	Anzahl der Honleisten
M	mm	Drehmoment
m_h	Kg	Masse der Honleiste
m_k	Kg	Masse der Zustelleinheit
μ	-	Reibkoeffizient Honleiste zu Zustellstange
μ_a	-	Reibkoeffizient Honleiste zu Werkzeug
μ_h	-	Tangentialkraftkoeffizient der Honleiste
μ_s	-	Tangentialkraftkoeffizient der Führungsleisten
μ_{s1}	-	Tangentialkraftkoeffizient der Führungsleiste 1
μ_{s2}	-	Tangentialkraftkoeffizient der Führungsleiste 2
n_w	U/min	Werkzeugdrehzahl
n	-	Anzahl der Zustellschritte
P	S	Aufweitung – Pausenzeit
p_{hr}	N/mm ²	Anpressdruck der Honleiste auf die Bohrungswand
Q'_w	mm ³ /mm ² s	Bezogenes Zeitspannungsvolumen
Q_w	mm ³ /s	Zeitspannungsvolumen
r_1	mm	Werkstückradius vor der Bearbeitung
r_2	mm	Werkstückradius nach der Bearbeitung
R_a	μm	Mittenrauhwert
R_{\max}	μm	Maximale Rautiefe
r_w	mm	Werkstückradius
R_z	μm	Rautiefe
t_a	s	Ausfeuerzeit
t_h	s	Honzeit
T_h, T_k	N	Trägheitskräfte von Honleiste und Zustelleinheit
V'_w	mm ³ /mm ²	Bezogenes Zerspannungsvolumen
v_a	mm/s	Axialgeschwindigkeit des Werkzeugs
v_c	mm/s	Schnittgeschwindigkeit
v_h	mm/s	Hubgeschwindigkeit
V_s	mm ³	Zerspannungsvolumen an der Honleiste
v_t	mm/s	Tangentialgeschwindigkeit des Werkzeugs
V_w	mm ³	Zerspannungsvolumen am Werkstück
v_z	mm/s	Zustellgeschwindigkeit der Honleiste
Z	mm	Aufweitung – Zustellung pro Zeiteinheit

α	Grad	Honwinkel
δ	Grad	Winkel zwischen Hon- und Führungsleiste 2
Δd	mm	Theoretische Änderung des Werkstückdurchmessers
Δr	mm	Zustellung in radialer Richtung
Δs	mm	Zustellung in axialer Richtung
ε	Grad	Winkel zwischen Hon- und Führungsleiste 1
φ	Grad	Konuswinkel
ψ	-	Momentenkoeffizient

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

CBN	Kubisches Bornitrid (englisch: cubic boron nitride)
C	Kohlenstoff
Si	Silicium
Mn	Mangan
Cr	Chrom
S	Schwefel

1 Einleitung und Motivation

Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide werden in der industriellen Fertigung seit Langem erfolgreich eingesetzt. Sie sind in der Herstellung von feinen Oberflächen mit definierten Eigenschaften unersetzlich, stellen daher ein wichtiges Forschungsgebiet dar und haben noch viel Potential für zukünftige Weiterentwicklungen [InTH93], [KoLT97], [WeTr04]. Das Honen als ein Verfahren dieser Gruppe umfasst selbst wiederum viele verschiedene Verfahrensvarianten, unter anderem zur Bearbeitung von planen oder zylindrischen Flächen. Eine der wichtigsten ist die Innenbearbeitung von Bohrungen durch das Langhubinnenrundhonen. Die Bearbeitung von hochpräzisen Bauteilen in einem Durchmesserbereich von 5-20mm soll in der vorliegenden Arbeit im Fokus stehen. Die Anforderungen an Maß-, Form- und Oberflächengenauigkeiten sind in diesem Fall mit Toleranzbereichen bis unter $1\mu\text{m}$ besonders hoch, oft müssen außerdem extrem kleine und eng tolerierte Paarungsziele erreicht werden. Mögliche Anwendungen finden sich in der gesamten metallverarbeitenden Industrie, insbesondere in der Automobilindustrie. Angewendet wird das Honen in der Regel als letzter Schritt in der Prozesskette, die bearbeiteten Bauteile sind daher bereits mit hohen Vorbearbeitungskosten behaftet. Eine hohe Prozessstabilität und Wiederholgenauigkeit sowie geringe Einfahrzeiten für neue Prozesse sind aus diesem Grund für das Honen erforderlich. Der Endbearbeitung kommt außerdem große Bedeutung zu, da die „Lebensdauer der Erzeugnisse in hohem Maße von der Beschaffenheit der Oberfläche abhängig ist“ [AWF32]. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft für den Bereich des Präzisionshonen von Bohrungen den Injektorkörper eines Einspritzsystems für Diesel- und Benzinmotoren und die zugehörige mehrspindlige Serienmaschine. Die bearbeitete Bohrung hat einen Durchmesser von 10mm, verteilt über fünf Honoperationen vom Vorhonen bis zum Fertighonen werden $150\mu\text{m}$ am Durchmesser abgetragen.

Ein mögliches Alternativverfahren zum Honen ist in einzelnen Anwendungsfällen das Innenschleifen zur Bohrungsfeinbearbeitung. Beim Innenschleifen ist der Werkzeugverschleiß und der damit verbundene Wechsel- und Abrichtaufwand aufgrund des geringen Stiftdurchmessers aber recht hoch [Alth82]. Durch die geringe Steifigkeit der Werkzeuge ergeben sich beim Schleifen außerdem hohe Prozesszeiten. Bei entsprechender Prozessauslegung bietet das Honen Vorteile. Durch die Selbstschärfung der Honleisten entfällt der Wechsel- und Abrichtaufwand. Außerdem ermöglicht

nur das Honen die Ausprägung der charakteristischen Oberflächentextur mit sich überkreuzenden Riefen. Diese bieten in der späteren Verwendung des Bauteils ein gutes Ölhaltevermögen bei gleichzeitig hohem Traganteil [Toli08].



Abbildung 1.1: Beispielbauteil und eingesetztes Maschinenkonzept [SBFK11].

Weiter steigende Anforderungen an die Genauigkeiten machen weitere Entwicklungen zur Prozessbeherrschung notwendig [TöAB00]. Auch die steigende Variantenvielfalt mit der Forderung nach kürzeren Einfahrzeiten für neue Prozesse und die Forderung nach verkürzten Prozesszeiten bedingen neue Entwicklungen. So sollen neue Regelstrategien zu verbesserten Qualitätsergebnissen führen und Einfahrzeiten für neue Prozesse verkürzen. Das Hochgeschwindigkeitshonen soll Abtrags- und Leistungssteigerungen erzielen und das Honen im Vergleich zu Konkurrenzverfahren wirtschaftlicher machen. Zur Bearbeitung von hochpräzisen Bohrungen ist derzeit in der Industrie das weggeführte Honen Standard. Dabei wird mit festen Zustellschritten in bestimmten Zeitabständen gearbeitet. Ein neuerer Ansatz ist das kraftgeführte Honen. Dabei werden die Prozesskräfte während des Honprozesses möglichst konstant gehalten.

Gesamtziel der vorliegenden Arbeit ist das Erreichen einer höheren Genauigkeit durch eine verbesserte Regelstrategie. Dabei stehen die Potentiale, Probleme und Weiterentwicklungsmöglichkeiten im Bereich des weg- und kraftgeführten Honens im Vordergrund. Die konkreten Forschungsfragen, die sich stellen sind dabei zum einen

die Analyse von weg- und kraftgeführtem Honen und die Unterschiede zwischen beiden Verfahren. Dazu sollen zunächst beide Verfahrensvarianten experimentell hinsichtlich ihrer Einflüsse und Wirkungen untersucht werden. Um eine verbesserte Regelstrategie umsetzen zu können, müssen die Übertragungswege von Kräften im System Maschine – Werkzeug – Werkstück bekannt sein. Die zweite Frage ist also die nach den Möglichkeiten zur mathematischen Modellierung der Prozesskräfte. Hier sollen verschiedene Ansätze aufgeführt und auf ihre Eignung hin überprüft werden. Mathematische Modelle ermöglichen die Berechnung und Vorhersage der auftretenden Kräfte am Werkzeug und können zur Prozessauslegung und zur Regelung herangezogen werden.

2 Langhub-Innenrundhonen von Bohrungen

2.1 Geschichtliche Entwicklung des Honverfahrens

Erste dem heutigen Honverfahren ähnelnde Ansätze stammen von Leonardo da Vinci, der bereits um 1500 eine „Maschine zum Ausschleifen von Hohlzylindern“ beschreibt [Feld22]. Abbildung 2.1 zeigt die Skizze dieser Zylinderschleifmaschine. Das Werkzeug aus Holz ist bohrungsfüllend und mit Rillen versehen, durch die Öl und Schmirgel transportiert werden. Während der Bearbeitung vollzieht es eine auf- und abgehende Hubbewegung. Auch eine zweispindlige Maschine ist bereits vorgesehen. Es dauert jedoch noch lange bis das Verfahren industriell eingesetzt wird.

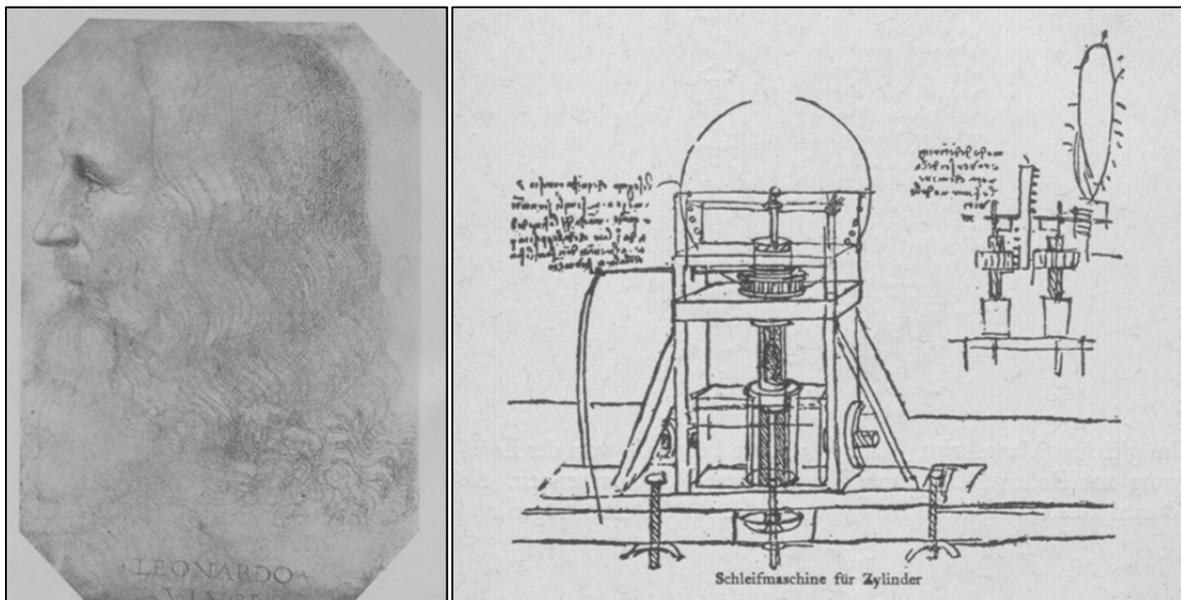


Abbildung 2.1: Leonardo da Vinci und seine Maschine zum Ausschleifen von Hohlzylindern [Feld22].

Um 1856 beschreibt das „Vollständige Handbuch der neuesten englischen Werkzeuglehre“ Verfahren zur Erzeugung von „inneren cylindrischen Oberflächen, wie, z. B., Hülsen oder Pfannen“ durch Ausschleifen [Hart56]. Verwendet werden dazu zylindrische Stäbe, zum Teil bereits expandierbar, die mit einer Schmirgelmischung hin- und hergehend durch das Werkzeug geführt werden. Auch Ansätze zur Paarungs- und Parallelbearbeitung sind aufgeführt [Hart56]. Verstärkten Einsatz und Weiterentwicklung erhielt das Honverfahren aber erst mit der Entwicklung der Automobilindustrie Anfang des 20. Jahrhunderts. Nach Haasis geht die Erfindung des modernen Honverfahrens auf die Maschinenbauanstalten Fritz Werner Fischer in

Wernigerode um 1910 zurück [Haas55], [KIFI01a]. Die weitere Entwicklung des Honens wird dann in Deutschland und den USA vorangetrieben. Henry Ford verwendet das Honen ab den 1920er Jahren erstmals in der Serienproduktion [Haas55]. Die Zeitschrift „Werkstattstechnik“ stellt 1924 zwei Konzepte für Polierwerkzeuge für Automobilzylinder vor [Werk24]. Eines ist mit zwei Honsteinen versehen, der Durchmesser wird voreingestellt und lässt sich während der Bearbeitung nicht mehr verändern. Das zweite arbeitet mit vier Honleisten, die sich konzentrisch aufweiten lassen. Beide Werkzeuge können auf Bohr- oder Schleifmaschinen eingesetzt werden. Westkämper beschreibt ein 1927 vorgestelltes Werkzeug der Firma Mayser und Schmidt aus Offenbach, das als „Honingwerkzeug“ bezeichnet wird. Hier erfolgt die Zustellung der Honleisten bereits über Konen, wie es auch heute noch üblich ist [West91]. Abbildung 2.2 zeigt Werkzeug- und Maschinenkonzepte aus den 1930er Jahren. Die Honleisten können zum Ausgleich des Werkzeugverschleißes und zur Anpassung an den Werkstückdurchmesser aufgeweitet werden. Typische Durchmesser der gehonten Bohrungen liegen zwischen 40mm und 450mm. Gehont wird häufig auf Drehbänken oder Bohrmaschinen mit rotierendem Honwerkzeug, die Hubbewegung wird dann von Hand ausgeführt, was großes Geschick erfordert. Die zunehmenden Anforderungen an die Genauigkeit machen die Entwicklung von speziellen Honmaschinen erforderlich.

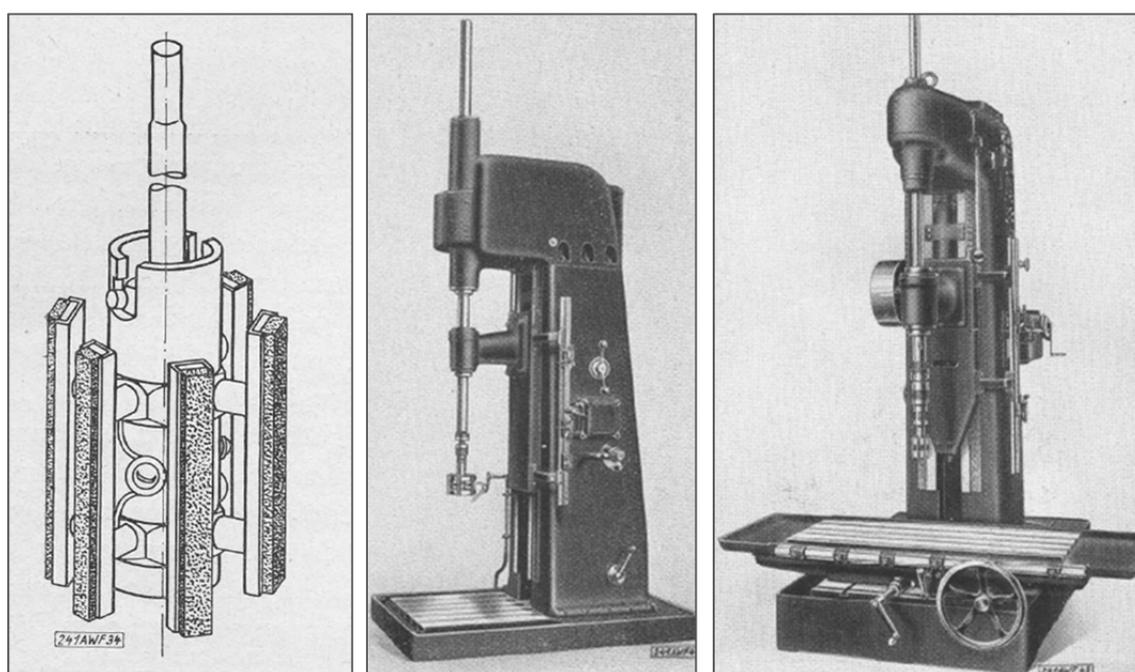


Abbildung 2.2: Verstellbare Ziehschleifahle, Ziehschleifmaschinen für einzelne und mit verstellbarem Tisch für mehrere Zylinder [AWF32].

Das Wort „Honen“ ist direkt vom englischen „Honing“ abgeleitet, die vorgeschlagenen deutschen Begriffe wie Reibschleifen, Feinschleifen oder Ziehschleifen konnten sich nicht dauerhaft durchsetzen [AWF32]. Durch eine „Empfehlung“ wurde der Begriff Honen 1941 durch den Begriff Ziehschleifen vorübergehend ersetzt [West91].

Die Vorteile des Honens liegen insbesondere in der Möglichkeit zur „Erzeugung einer hohen Oberflächengüte mit sehr hohem Traganteil“ [Voig57]. Dennoch favorisieren viele Anwender zunächst noch das länger bekannte Innenschleifen [Voig57]. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts beginnt der verstärkte Einsatz hochharter Schneidstoffe wie Diamant und später auch kubisches Bornitrid das Honverfahren zu verbessern und die wirtschaftliche Bearbeitung gehärteter Stähle zu ermöglichen [Juch84]. Die Entwicklung der Honmaschinen geht von den ursprünglich hydraulischen Zustelleinrichtungen mit konstanter Kraft zu den heute eingesetzten elektro-mechanischen Zustelleinrichtungen mit definiertem Weg. Haupttreiber der Entwicklung des Honens war und ist die Automobilindustrie [Haas56]. Aus diesem Bereich kommen die meisten Anwendungsfälle. Die Entwicklungen und Innovationen sind dabei so weit gefächert wie die bearbeiteten Bohrungen. Sie reichen von der Bearbeitung von relativ großen Zylinderbohrungen in Verbrennungsmotoren bis zu kleineren Zylinderbohrungen in Einspritzsystemen.

2.2 Das Honverfahren

2.2.1 Grundlagen

Die Systematik der Fertigungsverfahren nach DIN 8580 ordnet das Honen den trennenden Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide zu [DIN8580]. Das Honen ist nach DIN 8589-14 weiter definiert als „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 sich definiert überkreuzende Spuren aufweist.“ [DIN8589-14]

Diese allgemeine Verfahrensdefinition bezieht sich auf verschiedene Varianten des Honens, die in der [DIN 8589] nach Art der zu erzeugenden Fläche (Plan-, Rund-, Schraub-, Wälz-, Profil- und Formhonen), Art der Schnittbewegung (Langhub, Kurzhub) und Lage der Bearbeitungsstelle am Werkzeug (Außen, Innen) weiter untergliedert werden. Einige Varianten sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Langhub-Innen-Rundhonen von Präzisionsbohrungen

(Durchmesser unterhalb 40mm). Im Folgenden wird meist die verkürzte Bezeichnung Honen dafür verwendet.

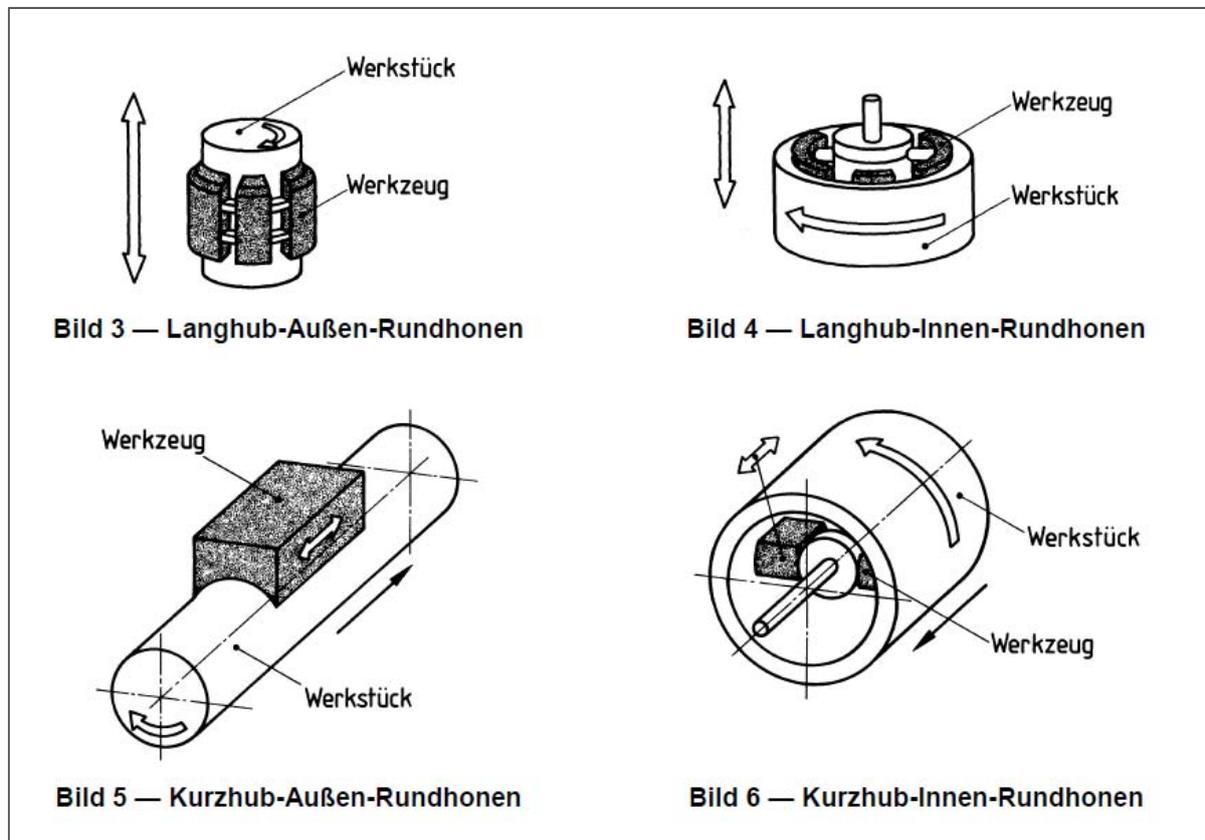


Abbildung 2.3: Übersicht über die Rundhonorverfahren mit vollständiger Benennung [DIN8589-14].

Das Honen ist der letzte Schritt in der Fertigungskette. Die Forderungen sind daher hohe Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit, hohes Abtragsvolumen bei geringem Werkzeugverschleiß und hohe Qualitätsergebnisse in Bezug auf Form, Maß und Oberfläche der gehonten Bohrung [West95].

Abbildung 2.4 zeigt die drei Bewegungskomponenten, die während des Honvorgangs überlagert werden. Dies sind die Hubbewegung entlang der Werkzeugachse, die Rotationsbewegung um die Werkzeugachse sowie die radiale Zustellbewegung der Honleiste. Die radiale Bewegung der Honleiste, die den Abtrag ermöglicht, wird durch eine axiale Bewegung der Zustellstange, die auch als Aufweitkonus bezeichnet wird, realisiert. Diese axiale Bewegung wird an der schrägen Auflagefläche zwischen Zustellstange und Honleiste in eine radiale Bewegung umgelenkt. Durch die Überlagerung von Hub- und Rotationsbewegung kommt es beim Honen zur Ausbildung einer charakteristischen Oberflächentextur mit sich überkreuzenden Riefen. Diese Tex-

tur ermöglicht ein gutes Ölhaltevermögen bei Einsatz der gehonten Bohrungen in geschmierten Zylinder-Kolben-Paarungen [Born69].

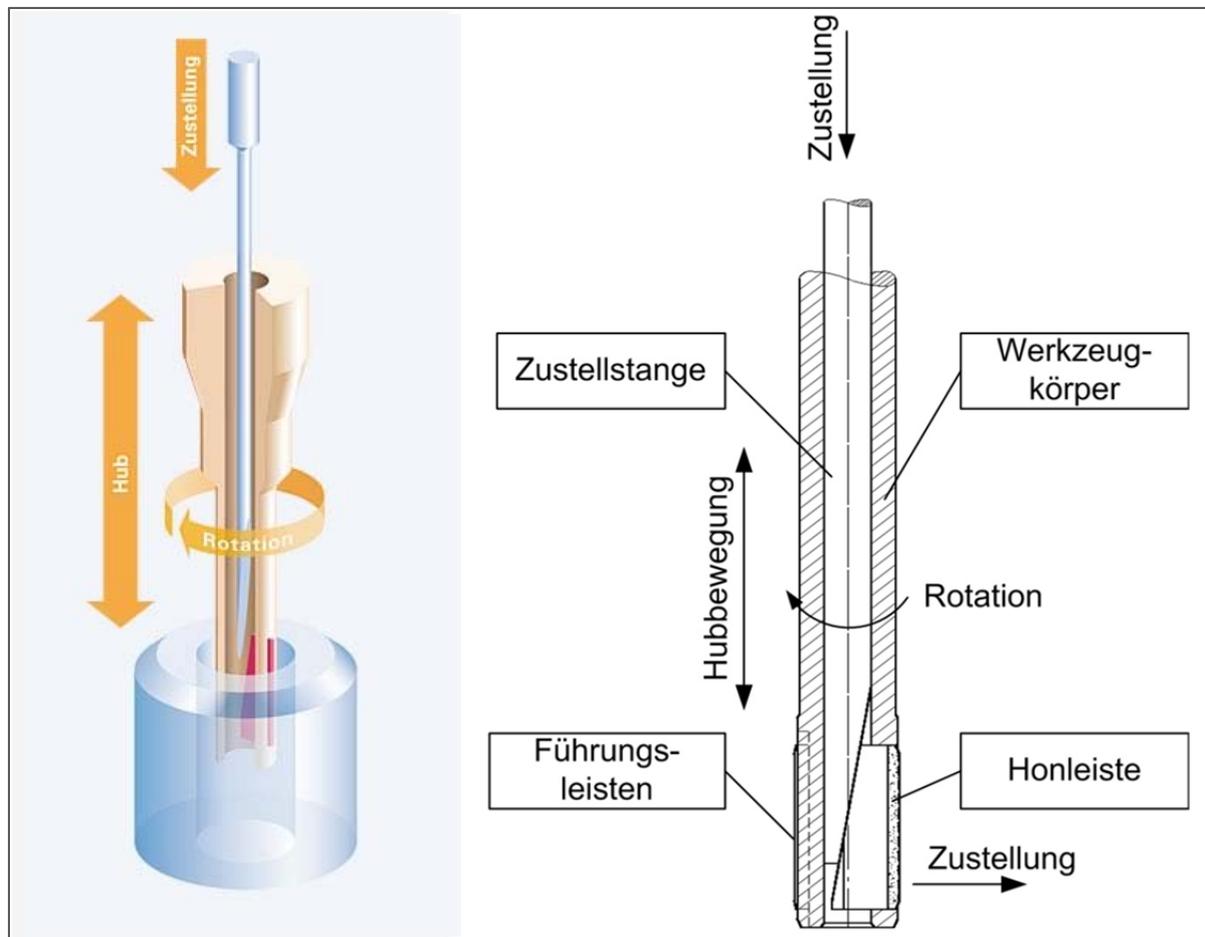


Abbildung 2.4: Prinzipskizze für das Langhubinnenrundhonen mit einem Einleistenwerkzeug [SBFK11].

Der Honwinkel α (auch als Überschneidungswinkel oder Überschleifwinkel bezeichnet), unter dem sich die überkreuzenden Rillen schneiden, berechnet sich aus dem Verhältnis von Axial- und Tangentialgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 2.5). Der Honwinkel sollte zwischen 30° und 70° liegen, um eine optimale Schmierung der Funktionsoberfläche im Betrieb zu ermöglichen. Wird der Honwinkel zu groß steigt der Ölbedarf, da Öl ungenutzt abfließen kann, ist er dagegen zu klein eingestellt, ist die Wirksamkeit des Schmierfilms durch Abstreifen durch den Reibpartner gefährdet [Mush86]. Während der Bearbeitung kommt es zu einem fast vollflächigen Kontakt zwischen Honleiste und Werkstück.

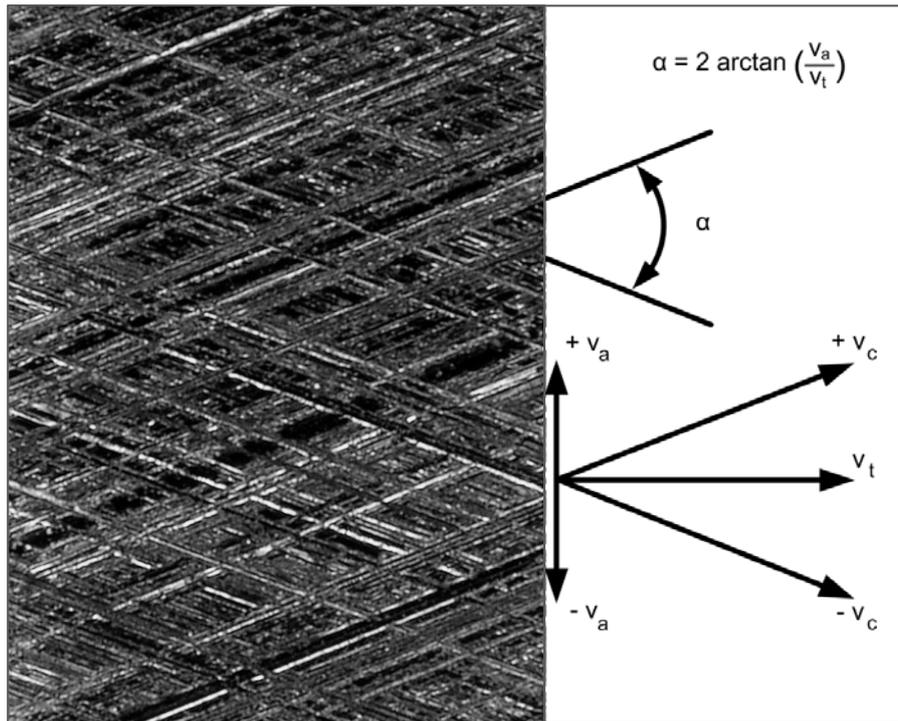


Abbildung 2.5: Charakteristische Oberflächenstruktur beim Honen und Honwinkel [SBFK11].

Die Schneidkräfte am Werkzeug sind beim Honen verhältnismäßig gering. Daraus resultieren geringe Prozesstemperaturen, eine Beeinflussung der Werkstückrandzone findet daher in der Regel nicht statt [Zett74].

Der Honprozess wird von vielen Einstell- und Störgrößen beeinflusst, die in Abbildung 2.6 aufgezeigt sind. Das System, bestehend aus der Honmaschine mit ihren Regelungsmöglichkeiten und dem zugehörigen Kühlschmierstoff, hat entscheidenden Einfluss auf den Prozess. Aber auch Werkstück, Werkzeug, gewählte Parameter und Umgebungseinflüsse sind nicht zu vernachlässigen. Während sich die Einstellgrößen, beispielsweise die Parameter, auf den jeweiligen Einsatzfall anpassen lassen, haben Störgrößen wie schwankende Vorbearbeitungsqualität oder Qualitätsunterschiede der Honleisten zum Teil gravierende Auswirkungen auf den Prozess, lassen sich aber nur bedingt kontrollieren oder beeinflussen. Die genannten Einflussgrößen sollen in den folgenden Kapiteln näher erläutert werden.

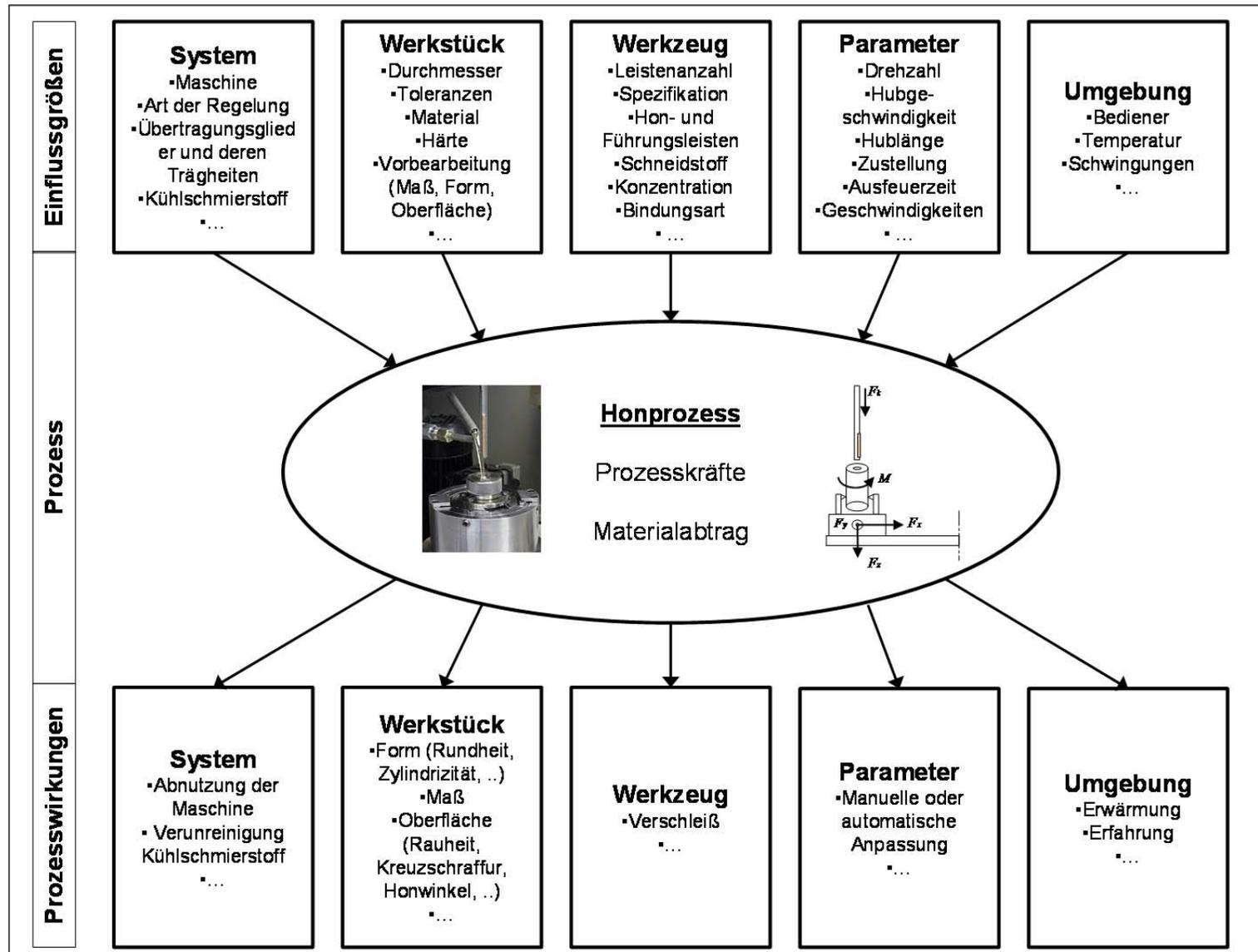


Abbildung 2.6: Einflussgrößen und Prozesswirkungen beim Honen.

2.2.2 System

Generell kann man Honmaschinen in zwei Gruppen einteilen, je nach Art der Zustellbewegung der Honleiste. Diese Vorschubbewegung kann entweder kraft- (hydraulische Systeme) oder wegabhängig (elektromechanische Systeme) erfolgen [Plas99], [Mush86], [Berg91], [Flor92]. Abbildung 2.7 zeigt den generellen Unterschied der beiden Varianten.

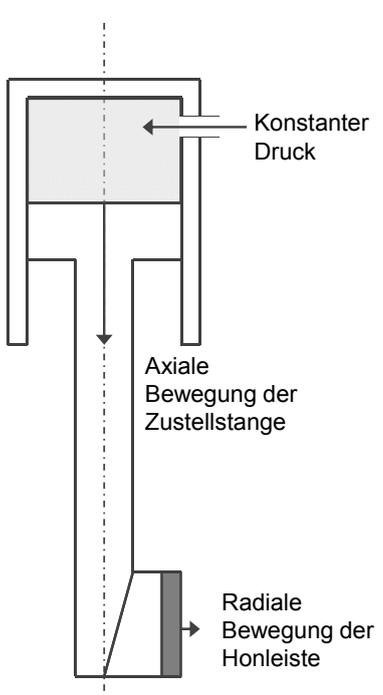
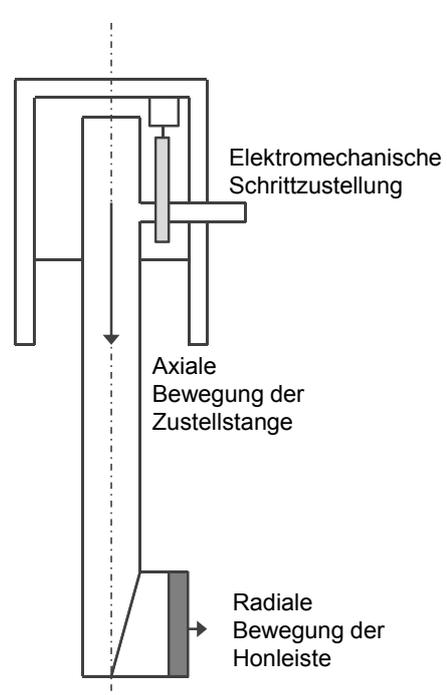
Zustellmechanismus		
Hydraulisch	Elektromechanisch	
 <p>Auf die Zustellstange wirkt ein konstanter Druck.</p>	 <p>Die axiale Bewegung der Zustellstange erfolgt über einen elektromechanischen Schrittmotor.</p>	
Darüber ergibt sich ein radialer Schneiddruck an der Honleiste.	Darüber ergibt sich die radiale Bewegung der Honleiste.	Alternativ kann die Kraft auf die Zustellstange überwacht werden.
Kraftabhängig	weggeführt	kraftgeführt

Abbildung 2.7: Arten des Zustellmechanismus beim Honen.

Im kraftabhängigen Fall wird während der Bearbeitung ein konstanter Hydraulikdruck eingestellt, dies entspricht einem Druck auf die Zustellstange. An der Schnittstelle

von Zustellstange zu Honleiste wird der Druck in einen radialen Druck der Honleiste gegen die Werkstückwandung umgewandelt. Hydraulische Maschinen werden heute wegen des großen Wartungsaufwands und der schwierigen Einstellung eines gewünschten Abtrags kaum noch verwendet.

In den Vordergrund getreten sind mittlerweile Maschinen mit elektromechanischem Vorschubsystem. Die Zustellbewegung der Honleiste bei diesem Maschinentyp kann wiederum weggeführt oder kraftgeführt erfolgen. Das weggeführte Honen ist derzeit in der Industrie weit verbreitet, die Honleiste wird dabei in bestimmten konstanten Zeitabständen (Pausenzeit P) um einen bestimmten konstanten Weg (Zustellung pro Zeiteinheit Z) zugestellt, vgl. Abbildung 2.8. Dies wird solange wiederholt, bis der gewünschte theoretische Abtrag erreicht ist. In dieser einfachen Steuerung wird auf Vorkommnisse während des Honens nicht eingegangen, der Prozessablauf ist von vorneherein festgelegt.

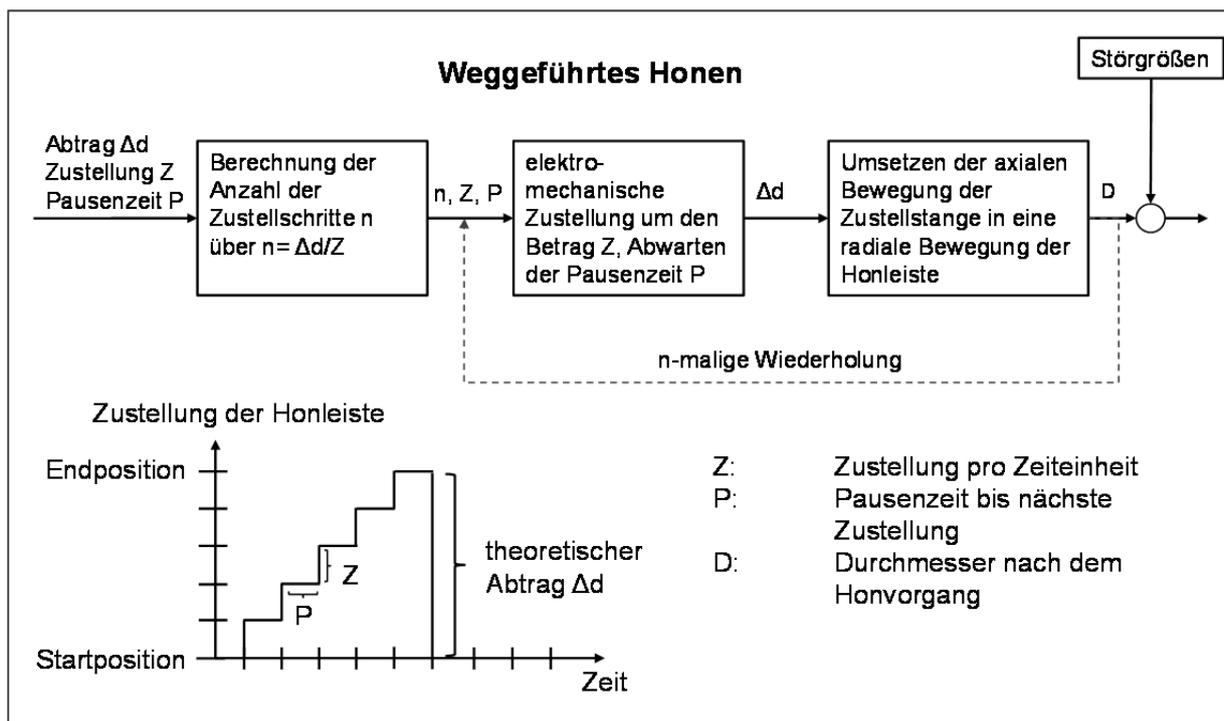


Abbildung 2.8: Prinzip des weggeführten Honens.

Im Gegensatz dazu werden in einem neueren Ansatz, dem kraftgeführten Honen die während des Prozesses auftretenden Kräfte überwacht und möglichst konstant gehalten (vgl. Abbildung 2.9). Dieses Verfahren versucht also die Vorteile der elektromechanischen Zustellung mit der konstanten Anpresskraft der hydraulischen Zustellung zu kombinieren. Dadurch soll ein stabileres Honen ermöglicht werden, das zu

besseren Ergebnissen in Bezug auf Form, Maß und Oberfläche führen und die Standzeiten der Honwerkzeuge verlängern soll [BäSc10], [KIFI04]. Außerdem sollen Einfahrzeiten für neue Prozesse verkürzt werden.

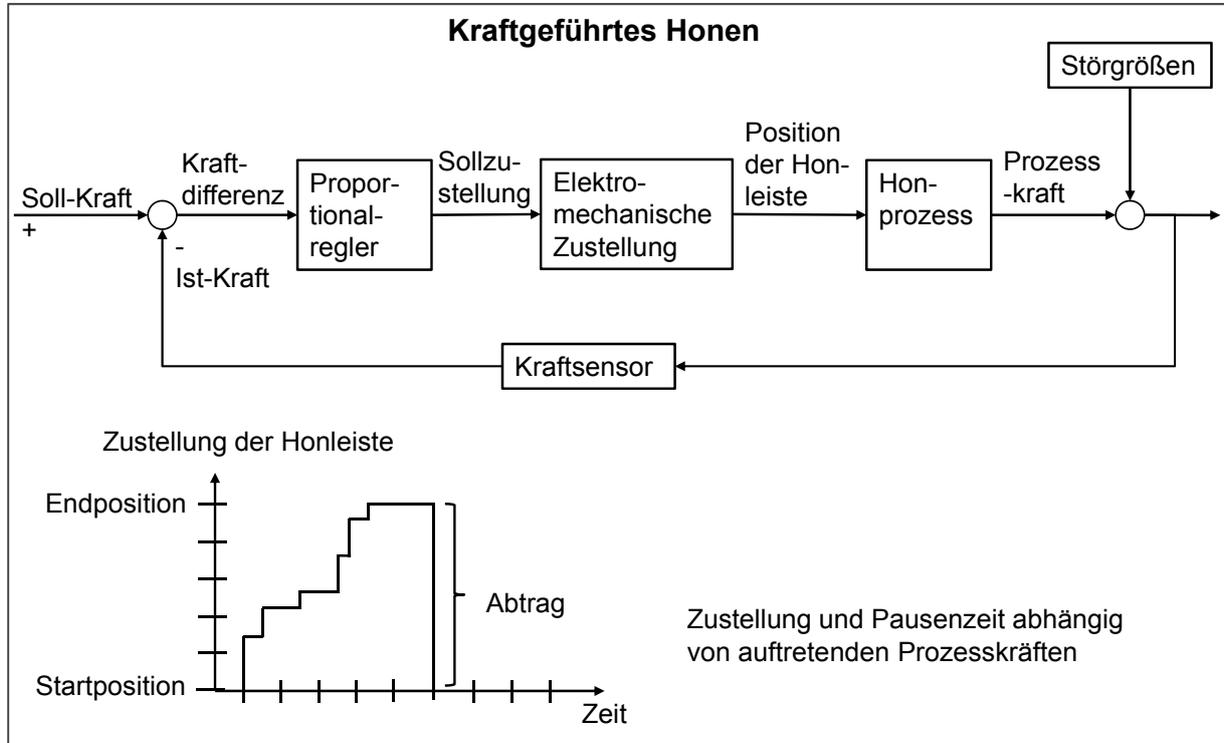


Abbildung 2.9: Prinzip des kraftgeführten Honens.

Ein Vergleich der beiden Ansätze ist in [BäSM12a] zu finden, verschiedene Regelstrategien für das Kraftgeführte Honen sind in [BäSM12b] aufgeführt. Dabei wird in einem ersten Entwicklungsschritt ein Dreipunktregler mit vorgegebenem Kraftfenster beschrieben. Übersteigt die gemessene Kraft das vorgegebene Fenster, wird einer der konstanten Zustellschritte zurückgenommen. Liegt die gemessene Kraft im Fenster, wird nicht zugestellt. Fällt die gemessene Kraft unter den vorgegebenen Grenzwert, erfolgt die Zustellung. In einem zweiten Schritt wird ein Kraftwert vorgegeben, aus gemessenem und gewünschtem Kraftwert wird die Differenz gebildet. Die Zustellschritte sind nun nicht mehr konstant, sondern abhängig von der ermittelten Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert. Eine dritte Variante macht schließlich nicht nur die Höhe der Zustellschritte sondern auch die Zustellgeschwindigkeit von der Kraftdifferenz abhängig [SBMF13]. Diese dritte Variante ist Grundlage für alle nachfolgenden Versuche zum kraftgeführten Honen.

Um das kraftgeführte Honen ermöglichen zu können, müssen die entsprechenden Honmaschinen mit einer internen Kraftmessung ausgestattet sein. Derzeit geschieht das in der Regel mittels Kraftsensoren, die oberhalb der Zustellstange in der Honmaschine integriert sind. Damit ist keine direkte Messung der Kräfte an der Honleiste möglich, die verschiedenen Einflüssen unterliegt. Eine Weiterentwicklung des kraftgeführten Honens ist daher durch Verwendung eines Werkzeugs mit integrierter Sensorik zur direkten Kraftmessung an der Honleiste möglich oder über die genaue Kenntnis der Übertragungswege der Kräfte im Honwerkzeug.

Neben der grundsätzlichen Frage der gewählten Zustellart und Regelstrategie gibt es noch weitere Ansätze den Honprozess für bestimmte Anwendungen zu optimieren. Dazu gehören Ansätze zur Inprozessmessung von Qualitäts- und Prozesskenngrößen beim Honen für die Innenbearbeitung von größeren Bohrungen, wie sie vor allem in Zylinderbohrungen in Verbrennungsmotoren vorkommen [Mask91a], [Kapp91].

Gehont wird generell unter Kühlschmierstoffzufuhr. Die beim Honen verwendeten Kühlschmierstoffe sind in der Regel ölbasiert. Sie müssen je nach Werkstoff und Honleiste an den Anwendungsfall angepasst werden [Zimm89]. Die Bedeutung des Kühlschmierstoffs für den Honprozess wurde bereits früh erkannt, so schreibt Haasis bereits 1955: „Dem Kühlmittel kommt beim Honen ganz besondere Bedeutung zu. Es soll die Wärme gut ableiten, eine gewisse Schmierwirkung haben und den Honstein offen halten. Daneben hat es die Aufgabe, den Werkstoffabschliff und Steinabrieb wegzuspülen, muss außerdem die Maschine schonen und darf den bedienenden Arbeiter nicht durch Geruch und Nebelbildung belästigen.“ [Haas55, S.45] Kühlschmierstoffe nehmen bei höheren Prozessanforderungen weiter an Bedeutung zu, sie sind nicht mehr nur Hilfsstoff, sondern „integraler Bestandteil eines Bearbeitungsprozesses“ [Mich95]. Die Aufgaben des Honöls bestehen dabei nach wie vor im Spänetransport, der Abfuhr von Wärme und der Schmierung. Die heute verwendeten Kühlschmierstoffe lassen sich über Art, Additivierung, Konzentration und Viskosität beschreiben [Mich95]. Die Additive dienen dabei der Verbesserung und Anpassung der Eigenschaften eines Basisöls. Es kann sich dabei beispielsweise um polare Zusätze, die die Schmierwirkung oder chemisch aktive Zusätze, die die Benetzungsfähigkeit verbessern, handeln. [Mich95] Beim Honen steht aufgrund der nur geringen Wärmeentwicklung während des Prozesses der Spüleffekt des Kühlschmierstoffes im Verhältnis zum Kühleffekt im Vordergrund. Daher werden eher niedrig viskose

Kühlschmierstoffe eingesetzt. Daneben ist eine ausreichende Schmierung wichtig [Mich95]. Der verwendete Kühlschmierstoff hat entscheidenden Einfluss auf wichtige Qualitätskenngrößen und den Werkzeugverschleiß. [Zimm89] Neue Entwicklungen im Bereich der Honöle tragen der zunehmenden Bedeutung Rechenschaft [Schl13]. Daneben gibt es auch Ansätze zur Verwendung umweltfreundlicher und ressourceneffizienter Kühlschmierstoffe, beispielsweise solche auf Biopolymerbasis [DHGW14]. In der Regel wird beim Honen das Werkstück überflutungsgekühlt, es gibt aber auch die Möglichkeit durch das Werkzeug Kühlschmierstoff direkt zur Wirkstelle zu bringen [Nage90].

2.2.3 Werkstück

Mittels Honen kann eine Vielzahl von Werkstoffen bearbeitet werden. Das Spektrum reicht von der Bearbeitung von Grauguss über die unterschiedlichsten Stähle und weitere Metalle (beispielsweise Aluminium, Bronze, Kupfer) bis zur Bearbeitung von Keramik und Glas [Born69, Flor92, KIKö05, WLFG96, WeKH96]. Je nach Material müssen Werkzeug, Parameter und Kühlschmierstoff auf den Anwendungsfall angepasst werden. Neben der großen Anzahl an bearbeitbaren Werkstoffen kann auch ein breites Spektrum an Bauteilen mit unterschiedlichen Geometrien gehont werden. Dies beginnt bei Bohrungen mit einem Durchmesser unter 1mm und geht bis zu Durchmessern über 2000mm und Längen über 12000mm. Das Honen kann dabei, unter Umständen unter Zuhilfenahme von Prozessanpassungen, alle möglichen Bohrungsgeometrien wie zum Beispiel Durchgangs-, Sackloch-, und unterbrochene Bohrungen bearbeiten.

Entscheidend für das Ergebnis des Honprozesses ist unter anderem die Vorbearbeitung der Teile. Stark unterschiedlich vorbereitete Teile verursachen Probleme während der Bearbeitung. Das Honen ermöglicht eine Formkorrektur nur, wenn die Formabweichungen kleiner sind als der Abtrag. Je nach Vorbearbeitungsqualität kann der Honprozess auch in mehrere Operationen unterteilt werden [Haas55]. Üblicherweise werden diese als Vor-, Zwischen- und Fertighonoperationen bezeichnet. Unter Umständen wird im Anschluss an das Honen gebürstet, um die Oberfläche weiter zu glätten und entstehenden Grat zu entfernen. Als Verfahrensvariante gibt es dabei auch das Bürsthonen [Flor89], bei dem Honen und Bürsten kombiniert werden.

2.2.4 Werkzeug

Beim Präzisionshonen von Bohrungen im Durchmesserbereich zwischen etwa 3mm und 20mm kommen vorzugsweise Einleistenwerkzeuge, die mit einer Hon- und zwei Führungsleisten ausgestattet sind, zum Einsatz. Größere Bohrungen werden oft mit Mehrleistenwerkzeugen gehont, sehr kleine (unter 3mm) mit Sonderwerkzeugen wie galvanisch belegten Schaftwerkzeugen (vgl. Abbildung 2.10).

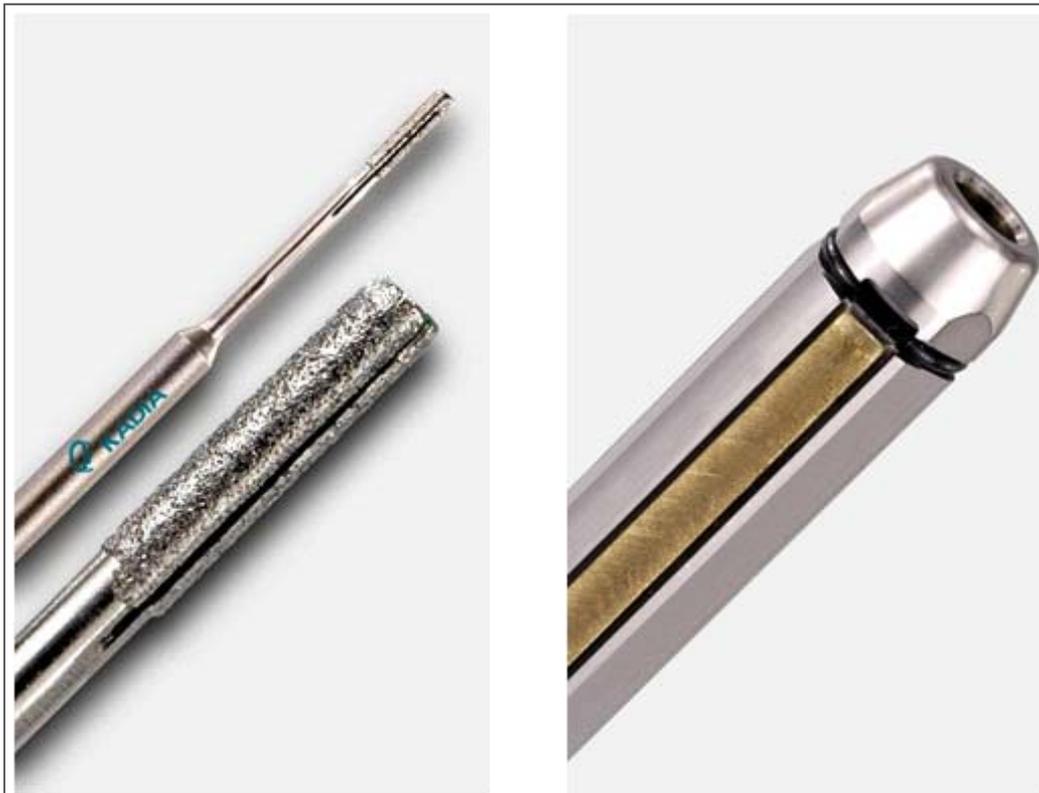


Abbildung 2.10: Links: Galvanisch belegtes Schaftwerkzeug; Rechts: Leistenwerkzeug [SBFK11].

Die Dimensionen der bearbeiteten Werkstücke können stark schwanken, sie reichen von sehr kleinen Bohrungen (unter 2mm) bis zu sehr großen Bohrungen (mehrere 1000mm). Auch die Längen der Teile bzw. deren Längen zu Durchmesser Verhältnis kann sehr unterschiedlich ausfallen. Entsprechend des Bohrungsdurchmessers müssen angepasste Werkzeuge entwickelt werden [Klin83].

Abbildung 2.11 zeigt exemplarisch ein Einleistenwerkzeug, ausgelegt für einen Bohrungsdurchmesser um 8mm, mit seinen Einzelteilen. Dies sind ein rohrförmiger Werkzeugkörper, eine Honleiste, zwei Führungsleisten, eine Zustellstange sowie Rückholfeder und Distanzhülse. Am entscheidendsten für den Honprozess ist hierbei die Honleiste, die üblicherweise aus einem Grundkörper aus Stahl mit dem Zustell-

profil und dem darauf aufgebrachtten Schneidbelag besteht. Der Schneidbelag wiederum setzt sich aus Schneidkörnchen und Bindung zusammen. Die axiale Bewegung der Zustellstange bewirkt über das Zusammenspiel von Zustellkeil und Zustellprofil die radiale Zustellung der Honleiste. Die beiden Führungsleisten sind in der Regel ähnlich aufgebaut wie die Honleisten. Da sie nicht am Abtrag beteiligt sein sollen, sondern der Führung des Werkzeugs in der Bohrung dienen, verfügen sie aber über deutlich feinere Körner in höherer Konzentration. Auch die Verwendung von Hartmetalleisten zur Führung ist möglich. Der Aufweitkonus sorgt mit der Übersetzung von axialer in radiale Bewegung für die Zustellung der Honleiste [SBFK11].

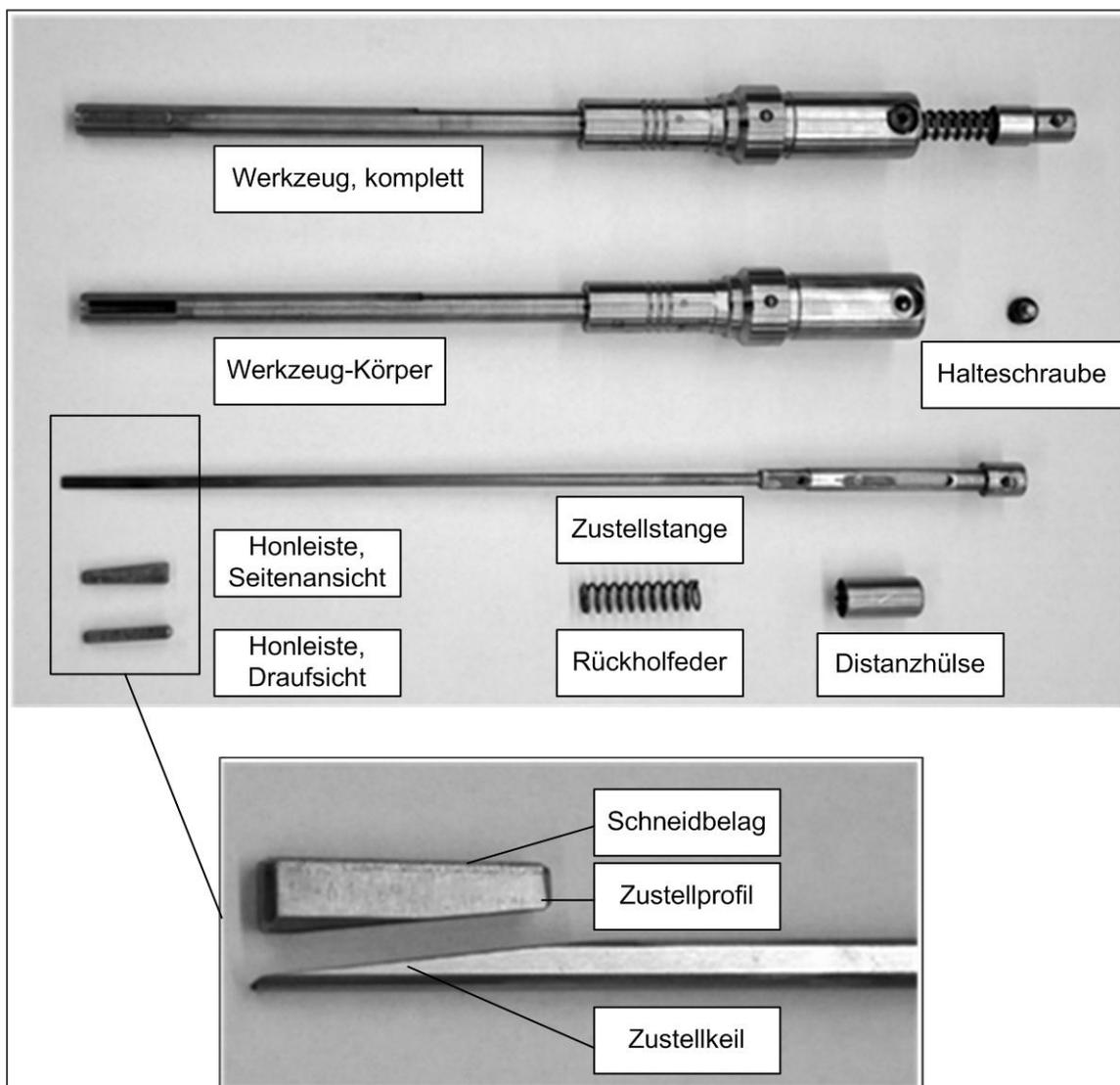


Abbildung 2.11: Einleisten-Honwerkzeug, Zusammenbau und Einzelteile [SBFK11]

Entsprechend der Vielzahl von bearbeitbaren Werkstoffen und Dimensionen müssen die Honleistenspezifikationen und dabei insbesondere die Kombination von Schneid-

stoff und Bindung auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst sein. Die Bindung hat entscheidenden Einfluss auf das Schneidverhalten und muss in ihrer Härte den Schneidkörnern angepasst sein. Generell wird unterschieden zwischen konventionellen und hochharten Schneidstoffen [Flor92], [KIKö05]. Zu den konventionellen Kornwerkstoffen zählen Siliziumkarbid (SiC) und Korund (Al_2O_3). Diese werden heute in der Präzisionsbearbeitung von Bohrungen aber kaum noch eingesetzt. Mit der zunehmenden Automatisierung und der steigenden Verwendung von Werkstücken aus gehärtetem Stahl und Hartmetall wurde es stattdessen notwendig, hochharte Schneidstoffe zu nutzen [Raff58], [Dyer67], [Dyer69]. Zunächst kommt dabei Diamant zum Einsatz, da hier die Standzeiten deutlich über denen der Werkzeuge mit konventionellen Schneidstoffen liegen [Haas56]. Haasis stellte dabei fest, dass das Honen mit Diamantwerkzeugen erhebliche Vorteile, „besonders in der Form- und Maßgenauigkeit kleinerer Bohrungen“, bietet [Haas55]. Auch Bornemann beschreibt 1969, dass die vorwiegend verwendeten Kornwerkstoffe SiC und Korund in zunehmendem Maße durch Diamant ersetzt werden [Born69]. Auch das nach Diamant zweithärteste Material, kubisches Bornitrid (englisch: Cubic Boron Nitride, CBN), wird seit seiner erstmaligen Synthese im Jahr 1957 durch R. H. Wentorf zunehmend als Kornwerkstoff verwendet [Went57], [Went61]. Nach anfänglichen Schwierigkeiten im Betrieb sind die hochharten Schneidstoffe bei der geometrisch unbestimmten Bearbeitung heute nicht mehr wegzudenken [Yege86]. In der Honleistenspezifikation müssen neben der Art des Kornwerkstoffes auch die durchschnittliche Korngröße, die Kornart und die Konzentration der Körner festgelegt werden. Da die Benennung von Leisten nicht einheitlich geregelt ist, haben verschiedene Herstellerfirmen hierzu verschiedene Systematiken entwickelt. Bei der Bindung kann es sich unter anderem um metallische, keramische oder Kunstharzbindung handeln. Die hochharten Kornwerkstoffe werden dabei meist mit metallischer Sinterbindung gebunden [BuVi13], es gibt aber auch Ansätze keramische oder Kunstharzbindungen zu verwenden [SaMM10].

Abbildung 2.12 zeigt ein einzelnes Schneidkorn einer mit CBN besetzten, metallisch gebundenen Honleiste. Das Korn hat eine Größe von etwa $20\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ und steht mit seiner Schneidkante $12\mu\text{m}$ über die Bindung vor. Durch den Herstellungsprozess der Honleisten ist eine inhomogene Verteilung der Körner auf der Leiste bedingt. Neben der Herstellung haben auch die Instandsetzung und der Zerspanvorgang großen Einfluss auf die Leistenoberfläche.

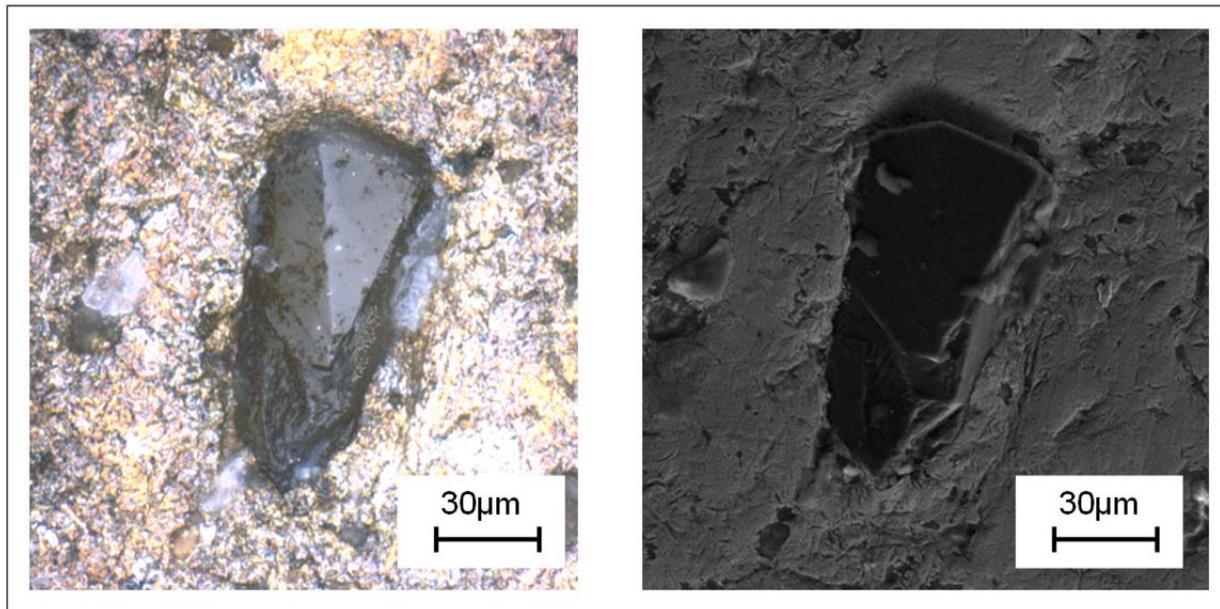


Abbildung 2.12: CBN-Korn in einer Honleiste mit metallischer Sinterbindung, Aufnahmen links: Laser-Scanning-Mikroskop, rechts: Raster-Elektronen-Mikroskop.

Dies hat gravierende Folgen für den Honprozess, Honleisten aus ein und derselben Charge können mitunter völlig unterschiedliches Verhalten zeigen. Einige Arbeiten beschäftigen sich aus diesem Grund mit Ansätzen zur Herstellung von Honleisten mit definiert angeordneten Schneidkörnern, beispielsweise die Arbeiten von Burkhardt et al. zum Spanen mit definiert angeordneten Schneidkörnern bei einschichtig belegten Hon- oder Schleifwerkzeugen [BuZB02], [BuRe02]. Ältere Ansätze dieser Art sind für das Schleifen bekannt [ChCH90]. Menze schlägt CVD-Diamant beschichtete Werkzeuge für das Honen kleiner Bohrungen (Durchmesser unter 3mm) vor [Menz08]. Einige Arbeiten beschäftigen sich außerdem mit der Untersuchung der Zerspanvorgänge beim Honen [Mask91b].

Neben Ansätzen zur Herstellung definierter Honleisten gibt es auch immer wieder Ansätze die dazu dienen sollen, die Eigenschaften von Honleisten zu bewerten. Einige Möglichkeiten zur „eindeutigen und reproduzierbaren Erfassung von Kenngrößen“ von keramisch gebundenen Honleisten beschreibt Pursche [Purs63], [Purs65]. Dabei wird die Leiste über ihre Bindungshärte (Kugeldruck-Prüfverfahren), eine Prüfkraft im Rahmen von Ritz-Schabepfungsverfahren (nach Goldau/Peklinek) oder über das E-Modul charakterisiert. Eine Übertragung auf metallisch gebundene Leisten mit hochharten Schneidkörnern gibt es derzeit nicht. Von See untersuchte die Auswirkungen von unterschiedlichen Honleistentopographien auf den Honprozess und versuchte Honleisten über die Abbott'sche Tragkurve zu charakterisieren [vSee89]. Er verwen-

dete dabei metallgebundene Diamant- und CBN-Honleisten. Keines dieser Verfahren zur Charakterisierung von Honleisten konnte sich dauerhaft durchsetzen.

Neben der Auswahl der Honleistenspezifikation sollte auch die Geometrie der Leiste auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Um Formfehler ausgleichen zu können, muss die Leiste im Verhältnis zur Bohrung lang und breit genug sein. Ist sie das nicht, läuft sie Formfehlern nach statt diese zu eliminieren [KIKö05]. Außerdem können Anpassungen der Geometrie, etwa in Form von Nuten an der Leiste bei Sacklochbohrungen mit eingeschränkter Hublänge, vorgenommen werden. Vor dem ersten Einsatz müssen die Honleisten durch Vorschleifen vorbereitet werden [Juch84]. Dabei erhalten insbesondere die Leisten mit hochharten Schneidkörnern eine dem Werkstück angepasste Form und werden aufgeschärft. Dieser Vorgang sollte auf den jeweils folgenden Honprozess genau angepasst werden, da sonst keine von Anfang an reproduzierbare konstante Werkstückqualität bei der Bearbeitung zu erwarten ist [vSee89].

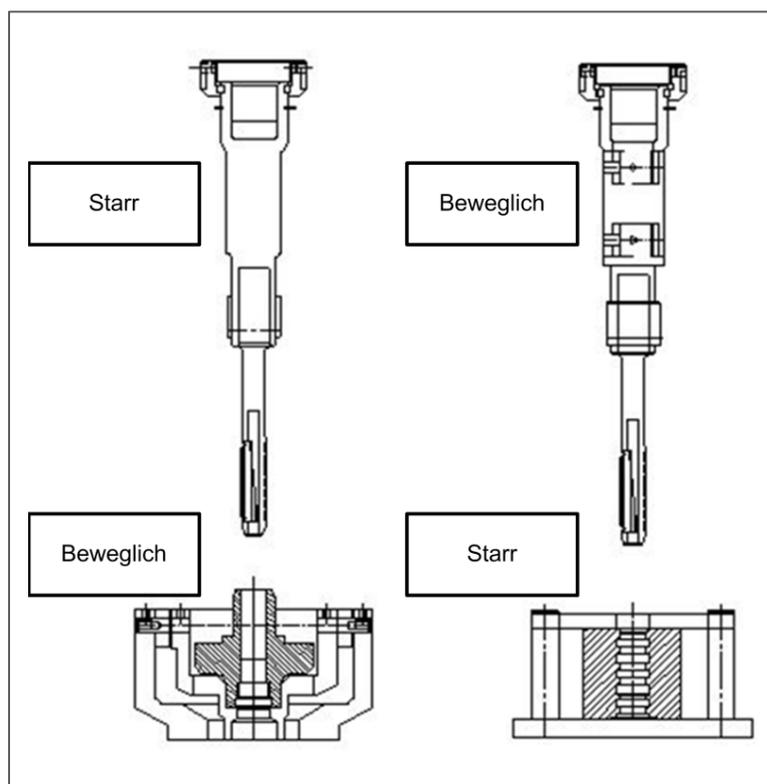


Abbildung 2.13: Freiheitsgrade im System Werkstück/Werkzeug [SBFK11].

Beim Honen müssen sich Werkzeug- und Werkstückachse zueinander ausrichten können. Um dies zu ermöglichen, müssen dem System Werkzeug-Werkstück die nötigen Freiheitsgrade zugeordnet werden. Bei kleineren Bauteilen werden dazu üb-

licherweise das Werkzeug starr und das Werkstück beweglich, beispielsweise in einer kardanischen Werkstückaufnahme, gelagert. Durch die kardanische Aufnahme der Werkstücke wirkt praktisch keine äußere Kraft auf die Werkstücke, sie wird daher häufig für hochpräzise Teile verwendet [Haas91]. Bei größeren Werkstücken wird dies aufgrund ihrer höheren Masse und damit Trägheit zumeist umgekehrt gehandhabt (vgl. Abbildung 2.13).

2.2.5 Parameter

Die wichtigsten Parameter beim Honen sind insbesondere diejenigen, die den Schneiddruck beeinflussen. Bei weggeführten Honprozessen sind Zustellung pro Zeiteinheit Z und Pausenzeit P ausschlaggebend, bei kraftgeführten Honprozessen die eingestellten Kraftwerte. Diese entscheiden über die Dauer des Honvorgangs und sind neben der angepassten Wahl von Werkzeug und bearbeitetem Werkstück auch entscheidend für die Qualität der Oberfläche. Daneben spielt die Schnittgeschwindigkeit eine große Rolle. Diese setzt sich aus der Drehzahl n_W [U/min] und der Hubgeschwindigkeit v_h [mm/s] des Werkzeugs zusammen. Die Parameter für neue Prozesse werden heute zumeist basierend auf Erfahrungswerten bestimmt und, falls nötig, experimentell optimiert. Die Einflüsse dieser wichtigen Parameter auf den Honprozess waren Gegenstand zahlreicher empirischer Untersuchungen. Diese Studien kommen zu teilweise sehr unterschiedlichen Ergebnissen, die im Folgenden kurz dargestellt werden. Sie lassen sich nur bedingt verallgemeinern, da sie sich in der Regel auf spezifische Werkstoff – Honstein- Kombinationen beziehen.

So hat beispielsweise Kessler umfangreiche Versuchsreihen angestellt um ideale Parameter für das Honen von Gusseisen mit Siliciumkarbid Honsteinen in einem Durchmesserbereich von 70-90mm zu finden [Kess53]. Tönshoff untersuchte das Honen mit Korund- und Siliziumkarbid-Honleisten. Auch hier werden ideale Parameterkombinationen zur Minimierung von Formfehlern und Rauheit gesucht [Töns70]. Bergen [Berg90] untersuchte den Einfluss von Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Überschleifwinkel auf die auftretenden Kräfte beim Honen. Dabei wurde festgestellt, dass die Kräfte vom Überschleifwinkel weitgehend unabhängig sind, mit steigender Schnittgeschwindigkeit fallen und mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigen.

Mit höheren Kräften beziehungsweise größeren Zustellschritten wird der Honvorgang beschleunigt und der Abtrag erhöht [Kess53], [Haas55]; die Rauheit der Oberfläche

verschlechtert sich aber. Dies wird durch das stärkere Eindringen der Körner in das Werkstück bei höheren Kräften erklärt. Die Oberfläche der Werkstücke kann zusätzlich durch die sogenannte Ausfeuerzeit t_a verbessert werden, die am Ende des Honprozesses steht. Während der Ausfeuerzeit gehen Hub- und Rotationsbewegung weiter, es wird aber nicht mehr zugestellt. Haasis beschreibt das Ausfeuern als dem beim Schleifen ähnlich, der Effekt wird entweder über eine geringere Druckstufe am Ende des Prozesses oder über die vorzeitige Beendigung der Werkzeugaufweitung erreicht. Eine zusätzliche Glättung kann dabei nachgewiesen werden. [Haas55]

Untersuchungen haben gezeigt, dass sich der Honprozess in einen stationären und einen instationären Bereich unterteilen lässt. In beiden Bereichen lassen sich grundsätzlich folgenden Aussagen treffen:

Bei erhöhtem Zustelldruck stellen [Kess53], [Haas55] und [Plas95] eine Erhöhung von Abtrag bzw. Zeitspanvolumen fest, Rauheit und Form werden dagegen schlechter. Die Untersuchungen beziehen sich auf SiC-Honleisten bei der Bearbeitung von Gusseisen im Durchmesserbereich um 100mm. Bornemann stellt dagegen keinen Einfluss auf Form und Rauheit fest [Born69]. [vSee89] spricht von einer linearen Abhängigkeit des Abtrags über dem Anpressdruck. Mit erhöhter Umfangsgeschwindigkeit lässt sich die Rauheit verbessern, auch der Abtrag nimmt zu, aber nur in geringem Maße [Kess53], [Plas95]. Nach [Born69] steigt das Zeitspanvolumen linear über der Schnittgeschwindigkeit. [vSee89] und [Mush86] stellten dagegen keinen Einfluss einer Änderung der Schnittgeschwindigkeit auf die Rauheit fest.

Biermann et al untersuchen den Einfluss von Hubgeschwindigkeit, Rotationsgeschwindigkeit, Anpresskraft und Bearbeitungszeit auf die Oberfläche beim Honen von unbehandeltem Stahl. Dabei werden Honleisten mit CBN in keramischer Bindung verwendet. Festgestellt wird ebenfalls eine erhöhte Rauheit bei erhöhter Anpresskraft. Dies kann durch ein tieferes Eindringen der Schneidkörner bei höherer Anpresskraft erklärt werden. Eine Veränderung der Oberflächenqualität bei erhöhter Hubgeschwindigkeit wird im untersuchten Parameterraum nicht festgestellt, erhöhte Rotationsgeschwindigkeit führt zu erhöhter Rauheit. Dies lässt sich nach Brinksmeier [BrGi03] mit einer erhöhten Effektivität der Spanbildung erklären. Über die Bearbeitungszeit wird auch hier zunächst eine starke Reduktion der Rauheit gefolgt von einer stationären Phase festgestellt. Ein erneuter Anstieg der Rauheit bei längerer Bearbeitungszeit kann nicht erklärt werden. [BiJK14]

Neben den vorgenannten Parametern haben auch die Hublänge und die Hublage entscheidenden Einfluss auf das Ergebnis, insbesondere in Bezug auf die Form der Bohrung [Töns70]. Idealerweise sollte die Honleiste auf die Bohrungslänge angepasst werden (vgl. Abbildung 2.14). Eine Faustregel besagt, dass der obere und untere Überlauf sollten ein Drittel bis maximal die Hälfte der Honleiste nicht überschreiten, da es sonst zu Verkippungen der Leiste kommen kann [Flor92], [SFBK11].

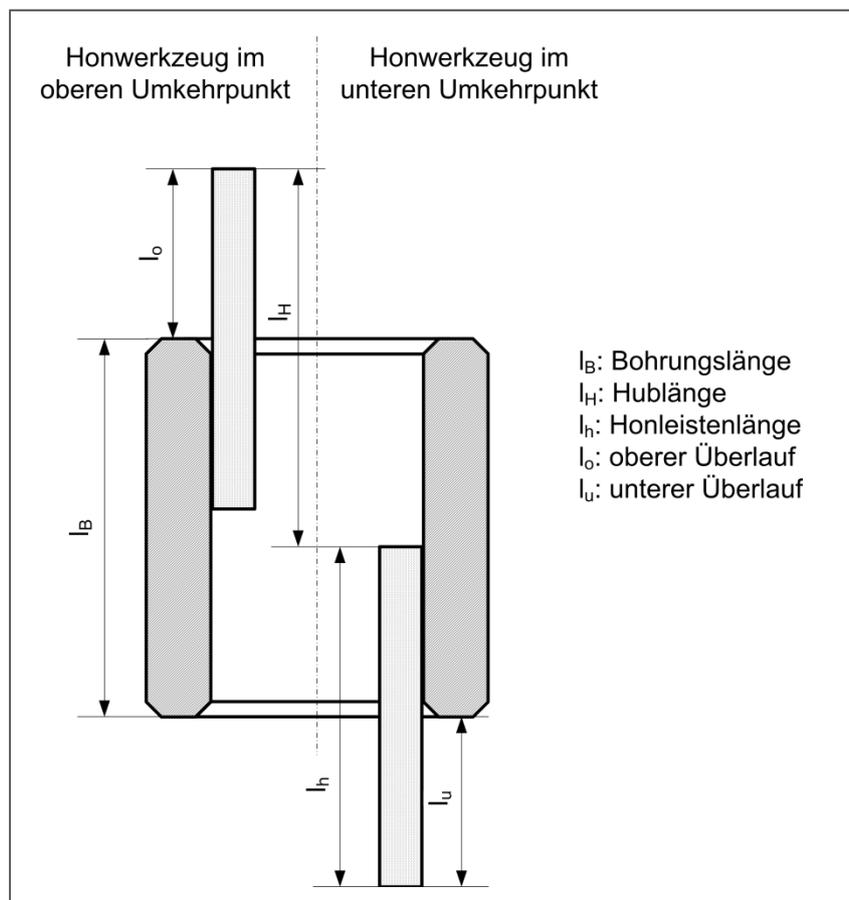


Abbildung 2.14: Prinzipskizze zur Anordnung von Bohrung, Honleiste und Hub [SFBK11]

Ist der Überlauf ein- oder beidseitig zu groß gewählt, wird auf der entsprechenden Seite zu viel Material abgetragen, es kommt zu konischen Bohrungen oder Vorweiten. Ist er dagegen zu klein gewählt wird die Bohrung ballig. Entsprechend Abbildung 2.14 ergibt sich die Hublänge zu [SFBK11]:

$$l_H = l_B + l_o + l_u - l_h \quad (2.1).$$

2.3 Untersuchungen und Modelle zum Bohrungshonen

Ein großes Feld der Anwendung des Honverfahrens findet sich in der Automobilindustrie, dementsprechend ist die Forschung auf diesem Gebiet so weit gefächert wie die bearbeiteten Bohrungen. Sie reicht von der Bearbeitung von relativ großen Zylinderbohrungen in Verbrennungsmotoren bis zu kleineren Zylinderbohrungen in Einspritzsystemen. Aus dem Bereich der Automobilindustrie kommen die meisten Anwendungsfälle für das Honen, hier gibt es auch die meisten aktuellen Entwicklungen und Innovationen.

Ein Beispiel ist das Koaxialhonen, das zur Entfernung von Einschnürungen bei partiell gehärteten Zylinderbohrungen in Kurbelgehäusen für Nutzfahrzeug-Motoren dient [KIFI01a]. Daneben gibt es zahlreiche Sonderformen wie die Bearbeitung von Kurbelwellenlagerbohrungen in Verbrennungsmotoren, die besondere Anforderungen an die Koaxialität stellt, die durch Führungen am Honwerkzeug erreicht werden kann [Weig05]. Eine weitere Sonderform ist das Paarungshonen. Dabei wird ein Kolben vor der Bearbeitung des Zylinders vermessen und die Zylinderbohrung im Anschluss passend zum Kolbendurchmesser fertigbearbeitet [KIFI04].

Ein weiteres Forschungsgebiet stellt die Untersuchung von Formhonorprozessen dar, die dazu dienen sollen, während der Bearbeitung, der Montage beziehungsweise des Betriebs entstehende Formabweichungen von Zylinderlaufflächen in Verbrennungsmotoren bereits im Voraus zu kompensieren. Dies wird über unterschiedliche Zustellung verschiedener Leistenpakete über die Hubbewegung erreicht [Weul88], [ScSM04], [Wien11].

Das Laserhonen dient der Erzeugung von Öltaschen in Zylinderlaufbahnen von Verbrennungsmotoren, um Reibverluste zu minimieren und den Ölverbrauch senken zu können [Abel05]. Dadurch können Öl- und Kraftstoffverbrauch in Verbrennungsmotoren reduziert werden [Abel07]. Neben dem Laserhonen wird auch das Fluidstrahlen in Verbindung mit einem Glätthonprozess zur Schaffung solcher Mikrodruckkammern genutzt [KIFI01b]. Viele Veröffentlichungen beschäftigen sich mit dem Honen von Zahnrädern (beispielsweise [WeLi05], [Wund89]), auf diese soll hier nicht näher eingegangen werden. Einige Arbeiten thematisieren das Honen von keramischen Werkstoffen [WLF96], [Höhn91] oder anderen neueren Werkstoffen, wie dem Honen von AlSi-Verbunden [Zell89], [KIFI01b]. Neben der Verbesserung und Erweiterung der bekannten Systeme hat sich eine ganze Reihe von Sonder-Honverfahren entwickelt. Dazu gehört das sogenannte Dornhonen, bei dem eine Bohrung mit einem einzigen

langen Hub fertig bearbeitet wird. Dornhonerwerkzeuge werden während der Bearbeitung nicht aufgeweitet, sondern vor der Bearbeitung mechanisch vorgespannt [vSee89]. Außerdem gibt es einige Ansätze zum Honen mit überlagerter Schwingung, auch Hochfrequenzhonen genannt. Dadurch kann einigen Studien zufolge der Abtrag deutlich gesteigert werden [Kapp95], [West95]. Dieser Effekt kann auch durch das sogenannte elektrochemische Honen erreicht werden, bei dem der konventionelle Honprozess durch einen elektrochemischen Abtragsprozess überlagert wird [MiJa10], [MiJD11]. Um das Honen flexibler auch in Kleinserien einsetzen zu können gibt es außerdem Konzepte zum Honen auf Kombinationsmaschinen [Paff11].

Ansätze zur Inprozessmessung von Qualitäts- und Prozesskenngrößen beim Honen finden sich für die Innenbearbeitung von größeren Bohrungen, wie sie vor allem in Zylinderbohrungen in Verbrennungsmotoren vorkommen (Durchmesser etwa 70mm bis 100mm). Die hier typischerweise verwendeten Mehrleistenwerkzeuge bieten deutlich mehr Einbauraum für Sensoren als die für kleinere Bohrungen verwendeten Einleistenwerkzeuge. Maskus [Mask91a] erstellt Konzepte für integrierte Qualitätsprüfungssysteme und erprobt verschiedene Sensorsysteme für die Messung während und zwischen den Honprozessen. Dabei steht insbesondere ein selbstentwickeltes Raster-Laser-Mikroskop zur Oberflächenmessung im Vordergrund. Uebelhör beschäftigt sich mit Konzepten zur Geometriemessung im Prozess, die es ermöglichen sollen Abweichungen durch entsprechende angepasste Regelungen eliminieren zu können [Uebe94]. Er untersucht dazu die Geometrie zum einen mittels sekundärer Messgrößen, wie der Prozesskräfte, zum anderen direkt mithilfe verschiedener Messsysteme. Heute haben sich pneumatische Sensoren zur Durchmesserüberprüfung zwischen, in einzelnen Fällen auch während des Honprozesses durchgesetzt. Plass untersucht zunächst die Parameter, die den größten Einfluss auf die Form der bearbeiteten Teile haben und schlägt dann zur Verbesserung der Ergebnisse eine kombinierte Regelung von Zustelldruck und Überlauf vor [Plas99]. Weitere Arbeiten konzentrieren sich auf die Regelung des Prozesses über die Qualitätsgröße Rauheit. Da diese mit den heute zur Verfügung stehenden Mitteln nicht während des Prozesses gemessen werden kann, messen [HoMe04] die Honnormalkraft und die Tangentialkraft um die empirisch ermittelte Abhängigkeit der Rauheit von den sich ergebenden Tangentialkraftkoeffizienten nutzen zu können. Dies soll eine qualitätsorientierte Prozessregelung ermöglichen. Die Methodik ist jedoch nicht ohne weiteres auf das Präzisionshonen von kleinen Bohrungen zu übertragen, da hier die Integrati-

on der Sensorik aufgrund des verringerten Raumangebots wesentlich schwieriger zu realisieren ist.

Mit der Modellierung und mathematischen Beschreibung von Honprozessen befassen sich ebenfalls einige Veröffentlichungen. Die einfachsten Zusammenhänge unter Vernachlässigung sämtlicher Reibungs-, Trägheits- und Deformationseffekte im Werkzeug sind häufig beschrieben (vgl. unter anderem [ViMO85], [Flor92], [KIKö05]). So gibt Formel 2.2 den theoretischen Zusammenhang zwischen radialer Zustellung der Honleiste Δr , Konuswinkel φ und axialer Zustellung des Aufweitkonus Δs wieder:

$$\Delta r = \Delta s \cdot \tan \varphi \quad (2.2)$$

Die Schnittgeschwindigkeit v_c beim Honen ergibt sich über die einzelnen Bewegungskomponenten zu:

$$v_c = \sqrt{v_a^2 + v_t^2} \quad (2.3)$$

Dabei bezeichnet v_a die Axialgeschwindigkeit und v_t die Tangentialgeschwindigkeit. Die dritte Geschwindigkeitskomponente, die Zustellgeschwindigkeit v_z kann für die Berechnung der Schnittgeschwindigkeit vernachlässigt werden, da sie im Vergleich zu den anderen Komponenten verschwindend gering ist [Flor92]. Über das Verhältnis von Axial- und Tangentialgeschwindigkeit ergibt sich der Honwinkel α (siehe Abbildung 2.5). Der Anpressdruck p_{hr} der Honleisten auf die Bohrungswand wird beschrieben mit der Honnormalkraft F_{hr} und der Honleistenoberfläche A_h , beziehungsweise mit Honleistenbreite b_h und -länge l_h , als:

$$p_{hr} = \frac{F_{hr}}{A_h} = \frac{F_{hr}}{b_h \cdot l_h} \quad (2.4)$$

Der Anpressdruck schwankt mit der Hubbewegung, die die im Eingriff befindliche Leistenoberfläche verändert.

Die Honnormalkraft F_{hr} berechnet sich mit dem Konuswinkel φ und der Anzahl m der gleichmäßig aufgeweiteten Honleisten zu:

$$F_{hr} = \frac{F_k}{m \cdot \tan \varphi} \quad (2.5)$$

Darüber hinaus gehend hat Zettel die Bewegungsgleichungen in den Umkehrpunkten unter Berücksichtigung von Längs- und Breitenspiel der Leistenaufnahme untersucht [Zett74]. Er geht dabei von einer hydraulischen Zustellung der Honleiste aus. Demnach wirken sich großes Längs- oder Breitenspiel negativ auf die Form- und Oberflächenqualität der bearbeiteten Bohrung aus.

Mushardt betrachtet die auftretenden Kräfte unter Berücksichtigung von Reibkräften für hydraulische und elektromechanische Zustelleinrichtungen. Er stellt von den theoretischen abweichende Kräfte aufgrund von Einschnürungen oder Aufweitungen am Werkstück fest und schlägt einen kraftgeführten Prozess vor [Mush86].

Fazit zum Stand der Technik

Die vorgestellten Ansätze zur Messung von Zielgrößen wie Form, Maß und Oberfläche während und zwischen den Honprozessen konnten sich bisher nicht durchsetzen. Auch die damit verbundenen Regelstrategien kommen bisher nur in Einzelfällen zum Einsatz. Weiterhin ist die pneumatische Messung des Durchmessers die wichtigste Überwachungsmöglichkeit. Die entwickelten Modelle zum Honen sind in ihren Ansätzen sehr unterschiedlich. Sie versuchen teilweise den Abtrag in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern wie Schnittgeschwindigkeit oder Zustelldruck zu simulieren oder Aussagen über die erwartete Längsform der Bohrung zu geben. Sie alle haben unterschiedliche Ansätze und weichen zum Teil gravierend von experimentellen Ergebnissen ab. Keines der Modelle gibt einen ganzheitlichen Überblick über die Kräfte während des Honprozesses. Dies ist aber Voraussetzung für neue Ansätze zur Regelung des Prozesses. So kann beispielsweise das kraftgeführte Honen nur erfolgreich funktionieren, wenn die Übertragungswege der Kraft von der Honleiste zur Zustellstange hinreichend bekannt sind.

3 Konzept und Fragestellung

Die technologische Zielsetzung sieht die Entwicklung einer Methodik vor, die das Honen von Bohrungen mit einer konstanten Anpresskraft der Honleiste auf die Werkstückwandung ermöglicht. Durch einen solchen Honprozess ergeben sich eine gleichmäßigere Werkzeug- und Werkstückbeanspruchung. Damit erreicht man ein gleichmäßigeres Abtragsverhalten, eine höhere Prozesskonstanz und eine höhere Bauteilqualität. Dies ist für den Honprozess, der in der Regel den letzten Schritt der Prozesskette bildet, von großer Bedeutung. Durch eine kraftgeführte Prozessregelung lassen sich außerdem Einfahrzeiten für neue Prozesse verkürzen und flexiblere Produktionen mit kleineren Stückzahlen sinnvoll bearbeiten.

Die für das kraftgeführte Honen notwendige Maschinenteknik ist vorhanden, die ansteuerbaren Achsen der Maschinen und die Zustellung am Werkzeug erfolgen mit ausreichender Genauigkeit und Dynamik. Auch die entsprechende Sensorik ist vorhanden, die Prozesskraft kann in der Regel oberhalb der Zustellstange gemessen werden. Damit kann die Kraft aber nur indirekt gemessen werden und nicht direkt an der Wirkstelle zwischen Honleiste und Werkstück. Eine sinnvolle Regelung der Kraft kann daher nur erfolgen wenn die Zusammenhänge bekannt sind. Der verwendete Ansatz sieht daher vor, die Kraftverhältnisse und das Übertragungsverhalten zu modellieren. Dadurch kann die gemessene Kraft an der Zustellstange zu der prozessrelevanten Kraft an der Honleiste in Bezug gesetzt werden. Zunächst sollen aber einige experimentelle Untersuchungen zum Vergleich von weg- und kraftgeführtem Honen durchgeführt werden.

Der folgende Abschnitt soll die Struktur der Modelle und die verwendeten Parameter beleuchten. Zunächst müssen einige Grundannahmen getroffen werden:

- Alle Übertragungselemente werden als ideal steif betrachtet
- Verschleißerscheinungen an der Honleiste und den Übertragungselementen werden nicht berücksichtigt
- Die Berechnung erfolgt mit Nennmaßen für die verwendeten geometrischen Größen
- Die Aufweitung der Bohrung während der Bearbeitung und die damit verbundene Änderung des Durchmessers wird nicht berücksichtigt

Die Grundlage der Modellierung bildet zunächst die Betrachtung der Kraftverhältnisse am Werkzeugumfang (vergleiche Kapitel 5.4). Das sich ergebende Moment kann

in Abhängigkeit von der Normalkraft der Honleiste auf die Bohrungswandung bestimmt werden. Dazu ist die empirische Ermittlung der Tangentialkraftkoeffizienten, die den Zusammenhang zwischen den tangentialen und normalen Kraftkomponenten angeben, notwendig. Das Moment am Werkzeugumfang kann außerdem experimentell bestimmt werden, eine Möglichkeit zum Vergleich von berechnetem und gemessenem Verlauf besteht daher. Für die Berechnung des Moments ist die Kenntnis der Normalkraft an der Honleiste notwendig. Diese kann nicht direkt gemessen werden, stattdessen wird die Konuskraft oberhalb der Zustellstange gemessen. Der Zusammenhang zwischen beiden wird nun in verschiedenen Detailierungsgraden ermittelt. Zunächst wird ein bekanntes geometriebasiertes Modell verwendet. Danach wird ein Modell unter Berücksichtigung von Reibeffekten im Werkzeug ermittelt. Schließlich wird ein phasenbezogenes Modell entwickelt, das Reib- und Trägheitseffekte in den unterschiedlichen Phasen des Honprozesses berücksichtigt.

Tabelle 3.1: Modellstruktur und Parameter.

Modell	Parameter	Dargestellte Zusammenhänge	Kapitel
Moment am Werkzeugumfang	Geometrische Größen, Tangentialkraftkoeffizienten	Moment als Funktion der Normalkraft an der Honleiste	5.4, 5.5
Geometrisches Basismodell	Geometrische Größen		6.1
Modell mit Berücksichtigung von Reibkräften	Geometrische Größen, Reibkoeffizienten	Normalkraft an der Honleiste als Funktion der Konuskraft	6.2
Phasenbezogenes Modell	Geometrische Größen, Reibkoeffizienten, Massen		6.3

Die Vorgehensweise ist in Tabelle 3.1 mit den entsprechend verwendeten Parametern und Kapiteln dargestellt. Alle Modelle zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen Konuskraft und Normalkraft an der Honleiste werden auf ihre Eignung hin durch Vergleich von gemessenen und berechneten Momentverläufen überprüft. Die Einflüsse der Modellparameter werden jeweils analysiert. Dadurch werden die Zusammenhänge deduktiv hergeleitet.

Im Anschluss werden die Potentiale der Modelle in der Anwendung dargestellt. Näher eingegangen wird dabei insbesondere auf die mögliche Optimierung der Kraftaufteilung am Honwerkzeug und die Prozessregelung mit angepasster Konuskraft.

4 Versuchsmethoden

4.1 Honversuche

4.1.1 Übersicht zur Versuchsdurchführung

Die folgende Abbildung 4.1 zeigt den prinzipiellen Ablaufplan der Versuche. Alle Werkstücke werden zunächst durch Bohren und Vorhonen auf einen möglichst gleichen Ausgangszustand gebracht und in ihrem Vorbearbeitungszustand auf die Merkmale Form, Maß und Oberfläche hin untersucht. Die verwendeten Messgeräte werden in Abschnitt 4.2 näher erläutert.

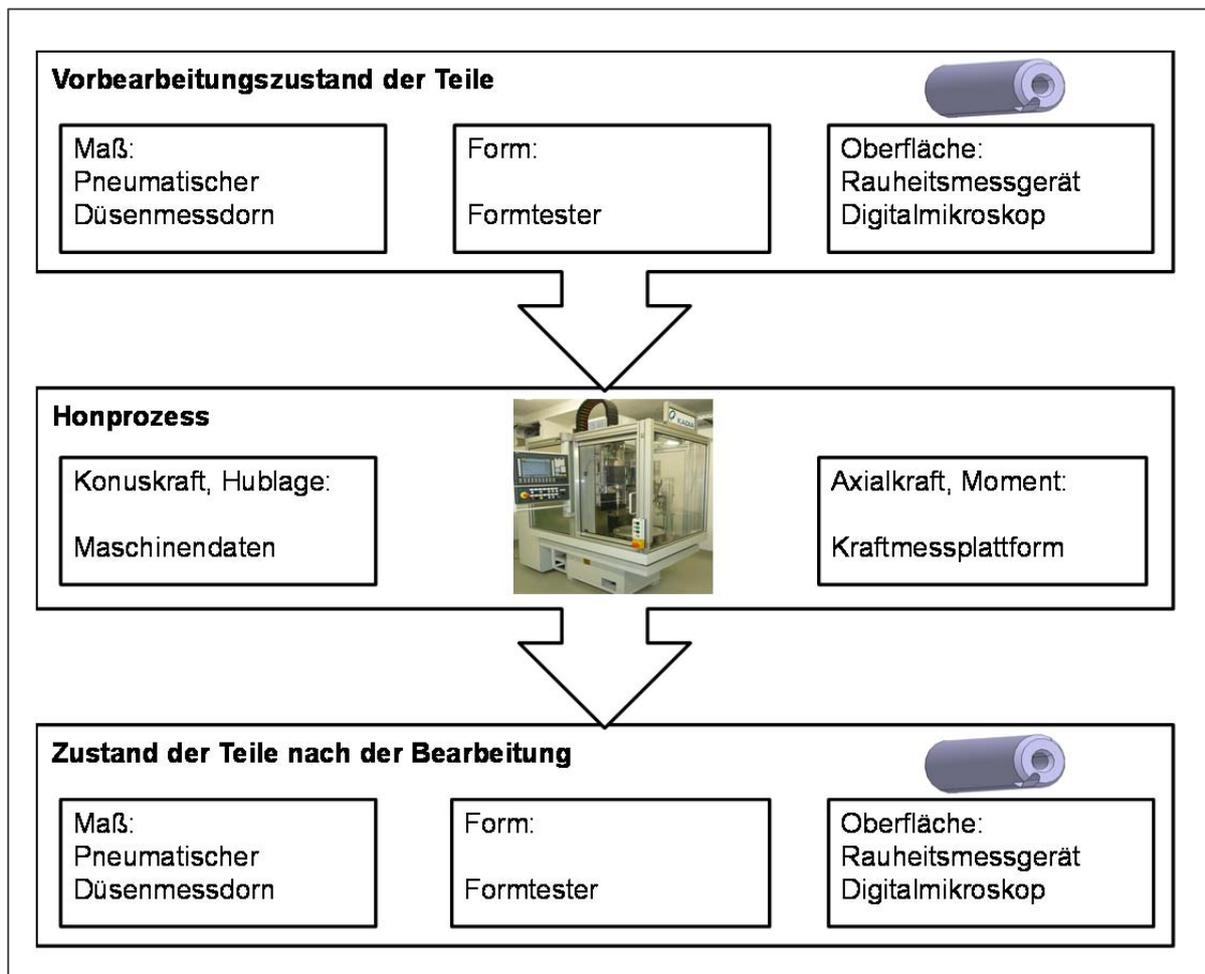


Abbildung 4.1: Versuchsdurchführung.

Im Anschluss an die Vorvermessung findet der Honprozess statt. Dabei werden Kräfte, Moment und Hublage erfasst und über einen Datenrekorder zur späteren Auswertung aufgezeichnet. Im Anschluss an die Honversuche werden die Werkstücke er-

neut hinsichtlich Form, Maß und Oberfläche analysiert. Die aufgenommenen Kräfte und Momente dienen zunächst der Analyse des Prozesses. Im weiteren Verlauf werden sie außerdem zur Berechnung und Validierung der Modelle herangezogen. Die Messungen von Form, Maß und Oberfläche der Versuchsteile soll Aufschluss über die Zusammenhänge zwischen Vorbearbeitung, Regelstrategie und Prozessergebnis geben. Im Folgenden werden zunächst die Honmaschine und die verwendeten Versuchsparameter vorgestellt.

4.1.2 Honmaschine

Bei der verwendeten Versuchsmaschine handelt es sich um eine einspindlige Vertikalhonmaschine der Baureihe LH30/300R, Fabrikat Firma KADIA Produktion GmbH +Co. in Nürtingen. Abbildung 4.2 zeigt links eine Gesamtansicht der Honmaschine.

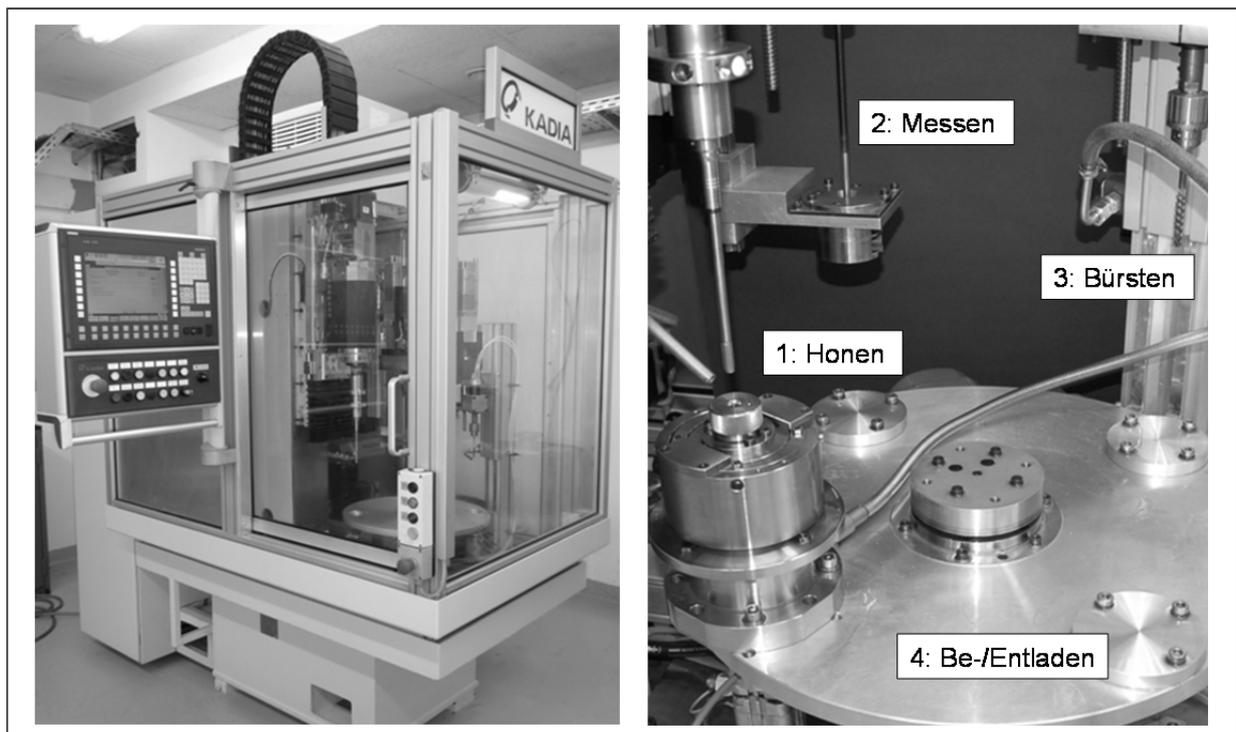


Abbildung 4.2: Links: Versuchsmaschine der Firma Kadia, Rechts: Maschinenraum mit den einzelnen Stationen.

Abbildung 4.2 zeigt rechts außerdem eine Detailaufnahme des Maschinenraumes mit Honstation (1), pneumatischer Düsenmessstation (2), Bürststation (3) und Be-/Entladestation (4). Das Werkstück mit Aufnahme kann über das Weitertakten des Rundtisches zu den einzelnen Stationen befördert werden. Die Honstation verfügt über eine elektromechanische Zustelleinheit und durch den oberhalb des Aufweitkonus

platzierten Kraftsensor (Quarkristall-Messunterlagsscheibe Typ 9061A mit entsprechendem Ladungsverstärker der Firma Kistler) außerdem über die Möglichkeit wahlweise weg- oder kraftgeführt zu honen.

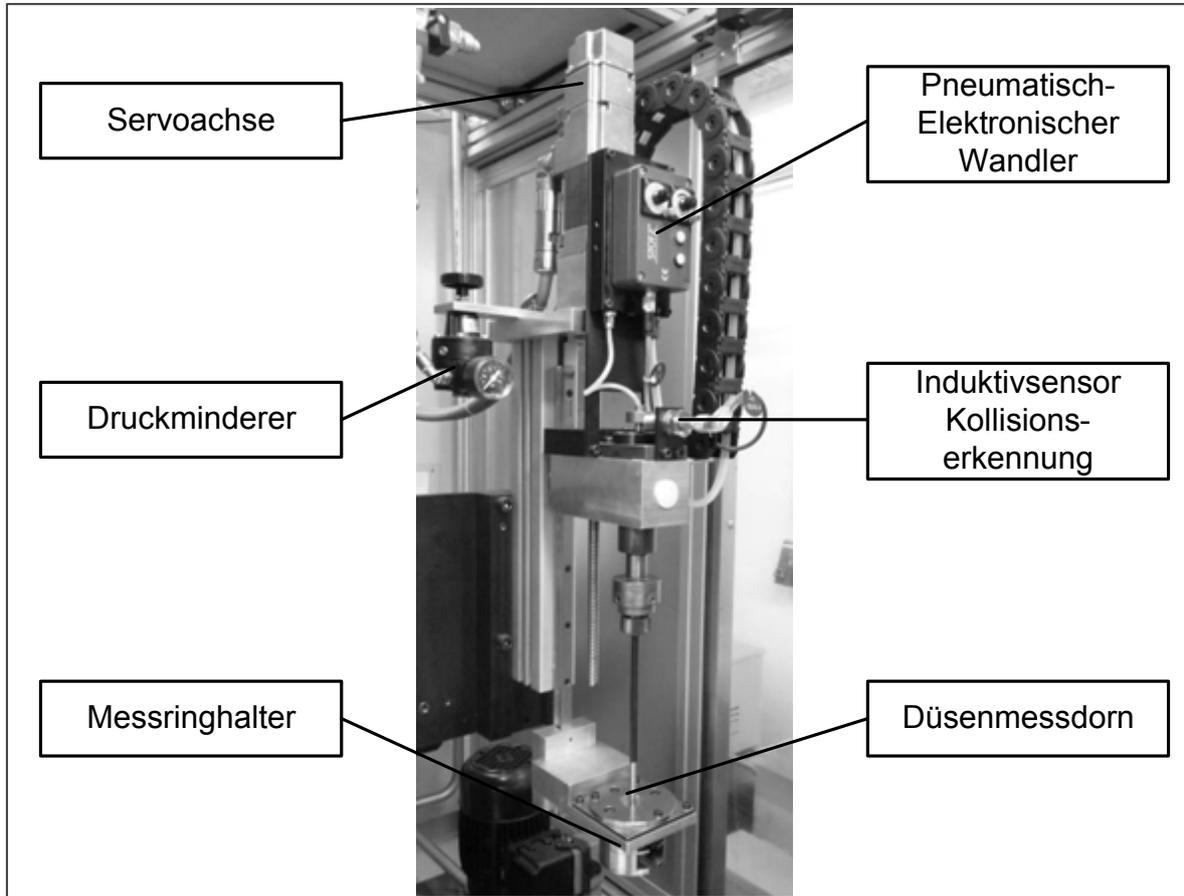


Abbildung 4.3: Bestandteile der pneumatischen Düsenmessstation [SBFK11].

Nach dem Honvorgang können die Werkstücke mithilfe des pneumatischen Düsenmessdornes der Firma Stotz prozessnah auf ihren Durchmesser untersucht werden (vgl. Abbildung 4.3). Dabei verursacht die aus dem Messdorn ausströmende Luft je nach Abstand zwischen Düse und Bohrungswand einen zur Spaltbreite proportionalen Staudruck in der Messleitung. Dieser wird durch einen Drucksensor erfasst und in einen Durchmesserwert umgewandelt. Die Messung erfolgt in mehreren Ebenen, sodass auch erste Rückschlüsse auf die Form der Bohrung gezogen werden können. Auf Abweichungen kann so nach der Messung schnell manuell durch den Bediener oder automatisch an der Maschine reagiert werden. Nach der Messstation folgt die Bürststation, die dem optionalen Entgraten und Glätten der Oberfläche mithilfe von Stahlbürsten dient. Das Be- und Entladen der Maschine erfolgt manuell. Sowohl

Hon- als auch Bürststation verfügen über eine Kühlschmierstoffzufuhr, das Honwerkzeug kann außerdem optional über eine innere Kühlschmierstoffzuführung versorgt werden.

4.1.3 Messtechnik

Neben dem maschinenintegrierten Kraftsensor oberhalb des Aufweitkonus ist unterhalb der kardanischen Werkstückaufnahme eine externe Kraftmessplattform der Firma Kistler vom Typ 9061A angebracht. Diese ermöglicht die Messung von Axialkraft, Querkräften und Drehmoment (vgl. Abbildung 4.4).

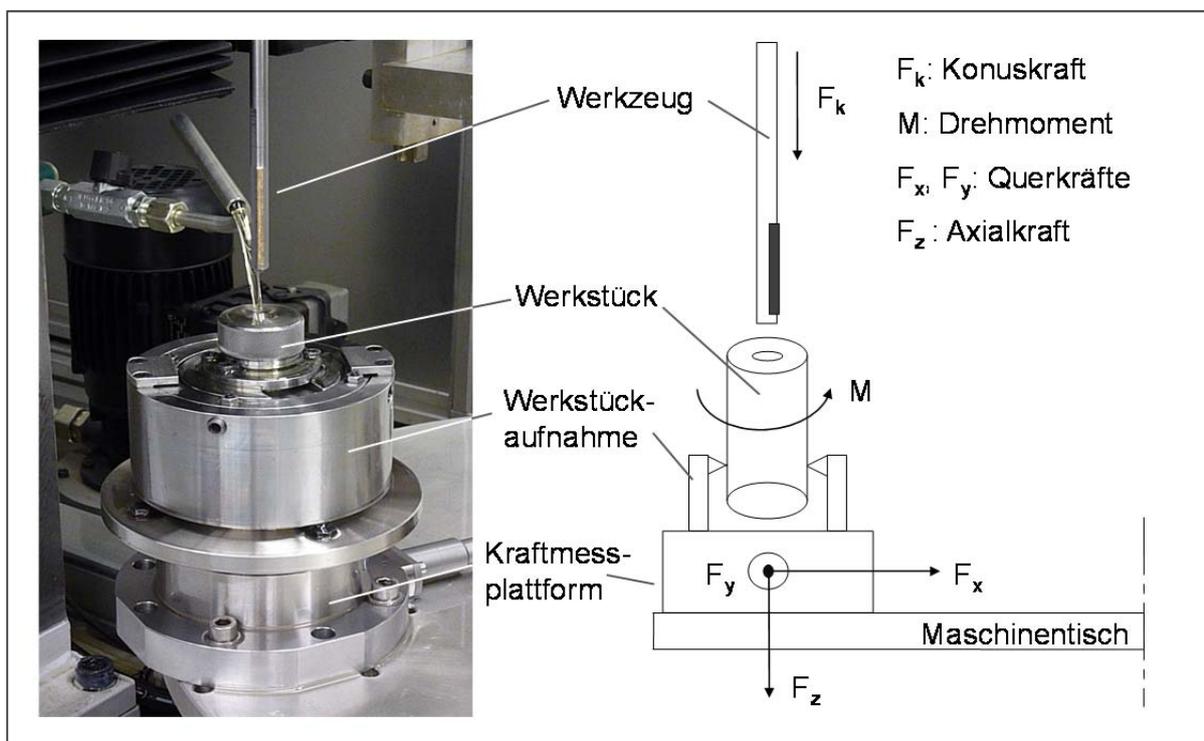


Abbildung 4.4: Werkstückaufnahme mit Kraftmessplattform.

Über einen Ladungsverstärker vom Typ 5019A werden die Signale weitergegeben. Die Kräfte werden während des Prozesses mitgeschrieben und über das mobile Datenaufnahmegerät Genesis 2i der Firma HBM aufgezeichnet. Dabei wird eine Abtastfrequenz von 10.000 Samples pro Sekunde verwendet. Das Genesis 2i zeichnet jeweils Hublage, Axialkraft, Konuskraft und Moment während der Honprozesse auf. Da die Querkräfte aufgrund der Freiheitsgrade der Werkstücklagerung verschwindend gering sind, werden diese nicht weiter betrachtet.

4.1.4 Prozessbedingungen

Die verwendeten Versuchswerkstücke sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Sie haben einen Innendurchmesser von 8,00mm, einen Außendurchmesser von 25mm und eine Länge von 50mm. Es handelt sich um reine Versuchswerkstücke die keine weitere Funktion erfüllen, hinsichtlich Durchmesser und Länge aber realen Werkstücken ähneln. Bei dem eingesetzten Werkstoff handelt es sich um den Einsatzstahl 16MnCr5 (Werkstoffnummer 1.7131 nach DIN EN 10084), der vor allem für verschleißbeanspruchte Bauteile verwendet wird. Der Werkstoff setzt sich zusammen aus etwa 0,16% Kohlenstoff (C), 0,25% Silicium (Si), 1,15% Mangan (Mn), 0,95% Chrom (Cr) und weniger als 0,035% Schwefel (S). Die Werkstücke wurden zum Teil einsatzgehärtet auf eine Rockwellhärte von HRC60 (+2) mit einer Einsatzhärtetiefe von 0,4mm (+0,2mm), zum Teil in unbehandelter Form mit HRC20 belassen. Sowohl Material als auch die beiden Härtewerte sind typisch für das Honen im betrachteten Durchmesserbereich. Die Werkstücke wurden einer Charge entnommen, sodass ein Werkstoffeinfluss bei den Untersuchungen weitgehend ausgeschlossen werden kann. Zur Sicherung gegen Verdrehen in der Werkstückaufnahme sind die Werkstücke mit einer Nut versehen.

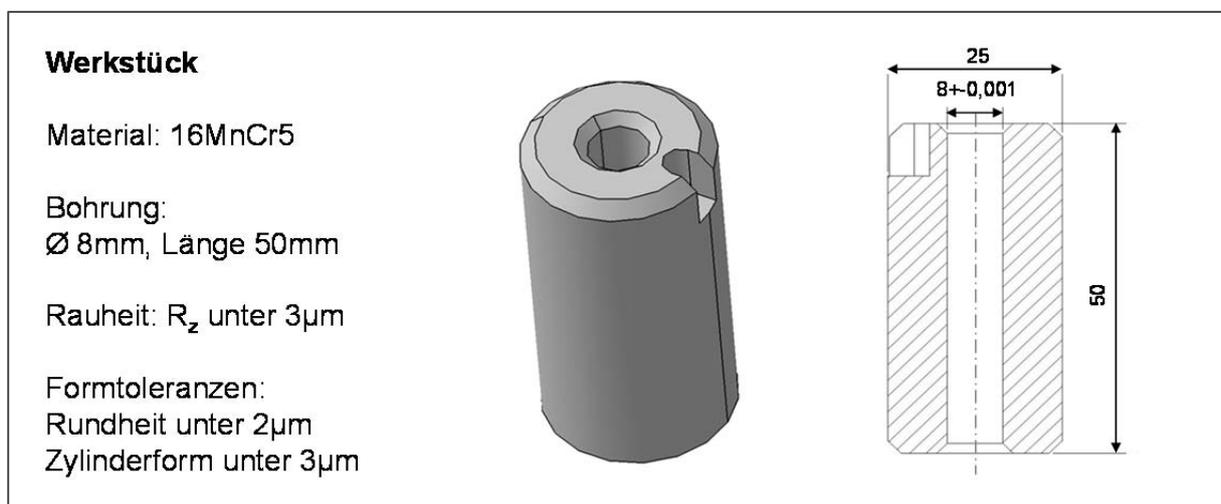


Abbildung 4.5: Versuchswerkstück.

Die verwendeten Honleisten enthalten Schneidkörner aus kubischem Bornitrid (CBN) für die gehärteten Werkstücke bzw. Diamant für die weichen Werkstücke. Auch diese Auswahl entspricht dem Stand in der Industrie. Die Schneidkörner liegen jeweils in metallischer Sinterbindung vor. Bedingt durch die Herstellung liegen die Körner dabei

in einer undefinierten Verteilung in der Honleiste vor. Die Anzahl und Art der im Eingriff befindlichen Schneiden ändert sich außerdem mit der Bearbeitung ständig, da währenddessen Körner ausbrechen, splintern oder stumpf werden können. Gehont wurde mit Einleistenhonwerkzeugen, die neben der Honleiste über zwei angepasste Führungsleisten verfügen.

Abbildung 4.6 zeigt in verschiedenen Größenordnungen die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen des ungehärteten Werkstoffs. Zu erkennen ist das Gefüge mit hellen ferritischen und dunklen perlitischen Anteilen. Dieses ist über das gesamte Werkstück zu erkennen.

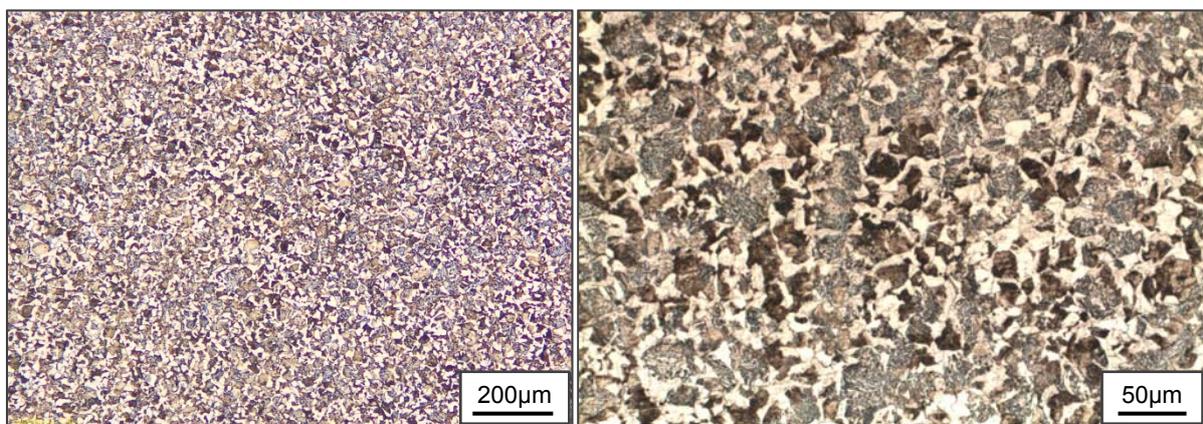


Abbildung 4.6: Gefügedarstellung für die unbehandelten Werkstücke.

Abbildung 4.7 zeigt dagegen die Gefügedarstellung der gehärteten Werkstücke an der Durchgangsbohrung mit entsprechender Einhärtetiefe sowie das gehärtete Gefüge.

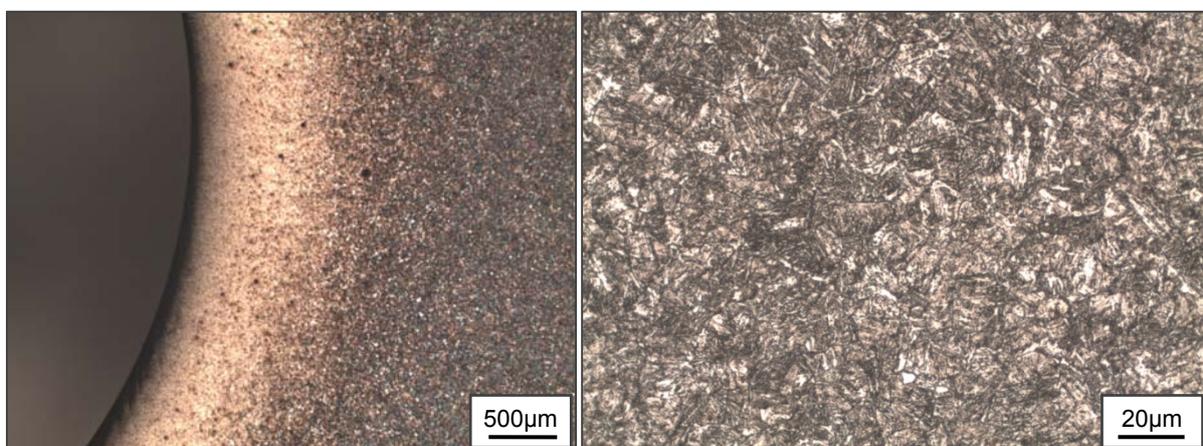


Abbildung 4.7: Gefügedarstellung für die gehärteten Werkstücke mit entsprechender Einhärtetiefe.

Im Verlauf erkennt man das heller erscheinende gehärtete Gefüge mit Martensit, das in das Vergütungsgefüge mit ferristischen und perlitischen Anteilen übergeht. Daneben ist eine Detailaufnahme des martensitischen gehärteten Gefüges zu sehen. Eine Härteuntersuchung bestätigt die vorgegebenen Werte von HRC20 beziehungsweise HRC60.

4.1.5 Prozessführung

Die in den Versuchen verwendeten Standardparameter (vgl. Tabelle 4.1) unterscheiden sich für die gehärteten und weichen Werkstücke. Unterschiede bestehen weiterhin für weg- bzw. kraftgeführtes Honen, da hier unterschiedliche Parameter benötigt werden.

Tabelle 4.1: Standardparameter weg- und kraftgeführt

Parameter	Werkstückmaterial	
	16MnCr5 HRC20	16MnCr5 HRC60
Drehzahl [U/min]	1000	1600
Hubgeschwindigkeit [mm/s]	260	260
Ausgangsdurchmesser [mm]	7,98	7,98
Abtrag [μm]	10	20
Hublänge [mm]	44	44
Honleiste	D15/503/13/50	B91/8014/8/50
Führungsleisten	D10/710/6/100	D76/710/6/100
Kühlschmierstoff	Kadiol 180	Kadiol 50
Konuswinkel am Werkzeug [$^{\circ}$]	2,5	2,5
Honleistenlänge [mm]	20	20
Honleistenbreite [mm]	3	3
Weggeführt		
Zustellschritt Z [mm]	0,0005	0,0005
Pausenzeit P [s]	0,5	0,25
Geschwindigkeit Zustellung [mm/s]	0,05	0,05
Ausfeuerzeit [s]	2	2
Kraftgeführt		
Konuskraft [N]	90	60
Ausfeuerzeit	2s	2s
Ausfeuerkraft	50N	50N

Vor der Fertighonoperation werden alle Teile vorgehont, um möglichst gleichmäßige Ausgangszustände zu erhalten. Der Winkel ε zwischen Honleiste und Führungsleiste 1 beträgt bei den verwendeten Werkzeugen 125° , der Winkel δ zwischen Honleiste und Führungsleiste 2 beträgt 215° . Die Bezeichnungen für Hon- und Führungsleisten sind nicht einheitlich geregelt, die hier gemachten Angaben beziehen sich auf die firmeninternen Bezeichnungen der Firma Kadia Produktion GmbH + Co., Nürtingen. Dabei bezieht sich der erste Buchstabe auf die Art der Schneidkörner, B steht dabei für kubisches Bornitrid, D für Diamant. Die erste Zahl bezieht sich auf die Größe der Schneidkörner nach FEPA, die zweite Zahl stellt eine interne Bezeichnung für die genaue Art der Bindung dar. Die dritte Zahl bezieht sich auf die Art der Schneidkörner, also beispielsweise splittrig oder blockig. In diesem Fall liegen blockige Körner vor. Die letzte Zahl steht für die Konzentration der Schneidkörner in der Leiste. Da beim Honen des weichen Werkstoffs Honleisten mit kleineren Schneidkörnern verwendet werden, ist der Abtrag hier geringer. Die gewählten Standardparameter stellen üblicherweise für die gegebenen Randbedingungen verwendete Parameter dar.

Tabelle 4.2: Geschwindigkeiten und Winkel für gehärtete und weiche Versuchsteile.

	Gehärtete Werkstücke	Weiche Werkstücke
Axialgeschwindigkeit	15,6m/min	15,6m/min
Tangentialgeschwindigkeit	40,2m/min	25,1m/min
Schnittgeschwindigkeit	43,1m/min	29,6m/min
Honwinkel	42,4°	63,6°

Aus Drehzahl und Hubgeschwindigkeit ergibt sich die axiale Geschwindigkeit v_a . Die Tangentialgeschwindigkeit v_t ist über die Drehzahl gegeben. Damit errechnen sich gemäß Abbildung 2.5 die in Tabelle 4.2 angegebenen Werte für den Honwinkel beim Honen von gehärtetem beziehungsweise weichem Werkstoff.

4.2 Analyse von Werkzeug und Werkstück

4.2.1 Oberflächenmessung

Zur Bestimmung der Oberflächenmesswerte wird ein Mahr Perthometer Marsurf XT/XR20 mit einer Vorschubeinheit PGK120 verwendet (vgl. Abbildung 4.8, links). Das Gerät arbeitet nach dem Tastschnittverfahren [Bods91]. Vermessen wird das

Werkstück an insgesamt 6 Messstellen. Die Verteilung der Messstellen ist in Abbildung 4.8 rechts zu sehen. Da die erwartete Rautiefe R_z zwischen $0,5\mu\text{m}$ und $10\mu\text{m}$ lag, betrug die Messstrecke nach [DIN4288] 4mm. Da das Perthometer zwecks An-tasten und Abheben zwei nicht in die Auswertung einbezogene Einzelmessstrecken von jeweils 0,8mm Länge zusätzlich durchführt, ergibt sich pro Messung eine Strecke von 5,6mm.

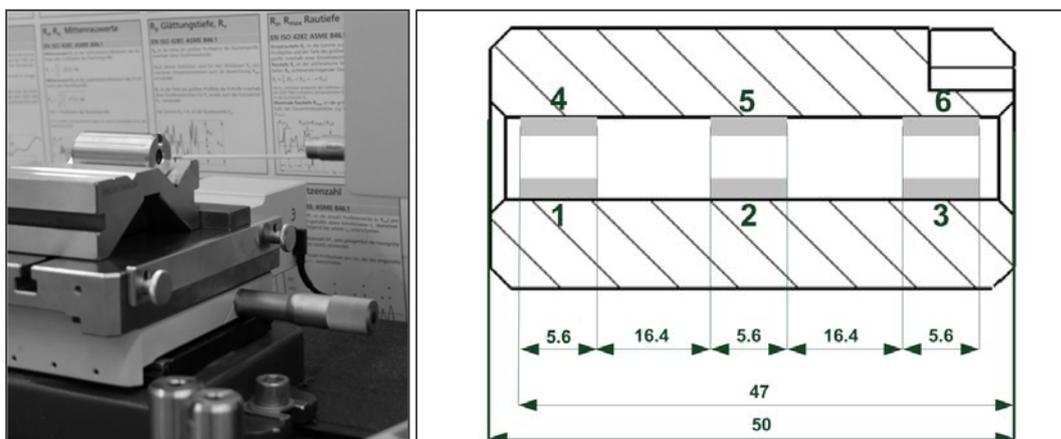


Abbildung 4.8: Oberflächenuntersuchung am Perthometer.

Aufgenommen wurden jeweils die Rautiefe R_z , der Mittenrauwert R_a und die Profiltiefe P_t nach [DIN4287]. Pro Werkstück wurde jeweils der Mittelwert über die 6 Messstellen gebildet.

4.2.2 Formmessung

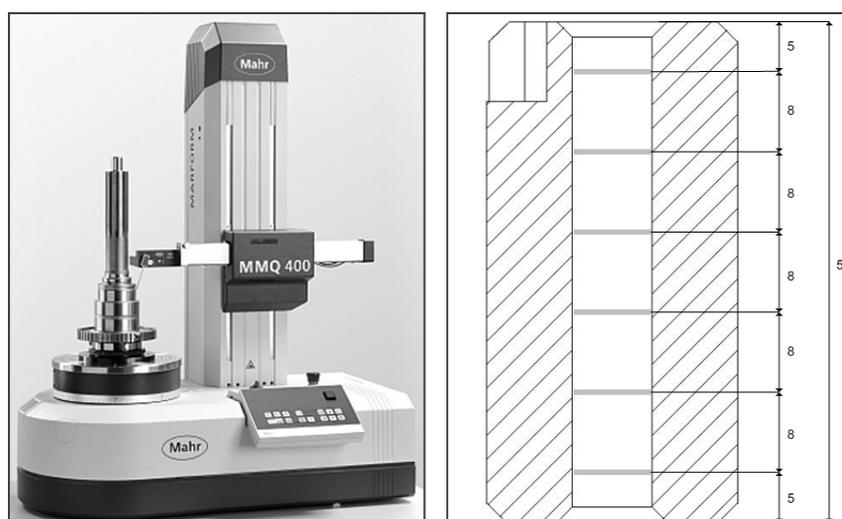


Abbildung 4.9: Links: Formtester MMQ400 (Bild: Mahr), Rechts: Messebenen am Formtester.

Der Formtester vom Typ Mahr MMQ 400 wird zur Ermittlung von Rundheit, Geradheit, Parallelität und Zylinderform herangezogen. Das Werkstück wird dazu in 6 Ebenen vermessen, der Formtester nimmt außerdem Längsprofile an vier jeweils um 90° versetzten Positionen auf (vgl. Abbildung 4.9).

4.2.3 Mikroskopie

Die Oberfläche der gehonten Bohrungen kann über den Boroskopaufsatz des Digitalmikroskops VHX-500F der Firma Keyence betrachtet werden (vgl. Abbildung 4.10). Die Software ermöglicht außerdem das Vermessen des vorliegenden Honwinkels. Der Honwinkel wurde jeweils in der Mitte des Werkstücks erfasst um Verfälschungen durch die kleineren Hubgeschwindigkeiten in den Umkehrpunkten zu umgehen.

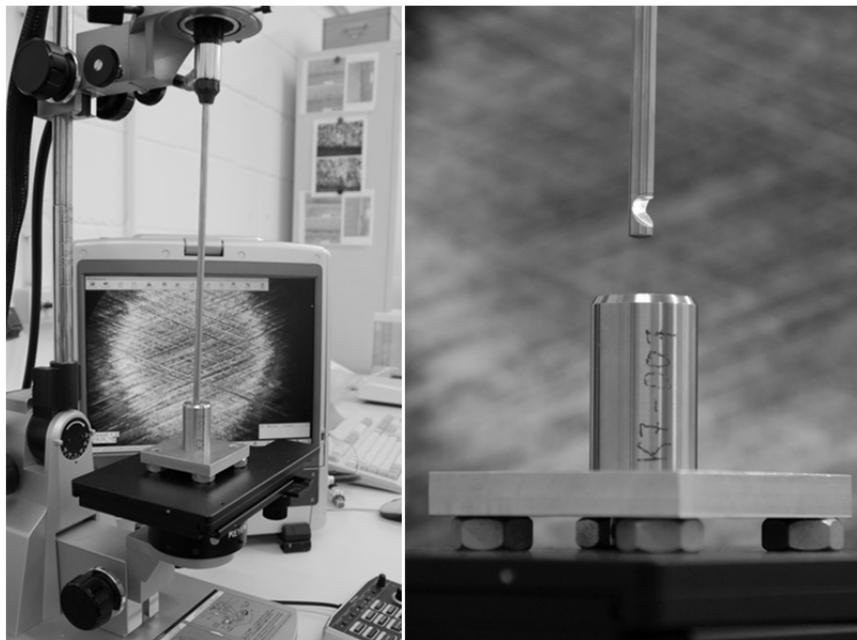


Abbildung 4.10: Digitalmikroskop der Firma Keyence.

4.3 Ermittlung von Tangentialkraftkoeffizienten

4.3.1 Versuchsstand

Der Versuchsstand wurde zur Bestimmung von Tangentialkraftkoeffizienten verwendet. Abbildung 4.11 zeigt den verwendeten Messaufbau zur Bestimmung von Tangentialkraftkoeffizienten. Der Messaufbau ist auf einer Drehmaschine eingerichtet und an das Außenrundhonen angelehnt. Dadurch ist die Messung der Kräfte an der Honleiste deutlich vereinfacht, die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf das Innen-

rundhonen ist gegeben [SaSe87]. Auch eine Überwachung und Untersuchung des Werkstückes ist leichter möglich. Im Versuch wird die Honleiste dabei von außen gegen die Werkstückwandung gedrückt, die Normalkraft F_n (entspricht der radialen Kraft auf die Honleiste F_{hr}) und die Tangentialkraft F_t (entspricht der tangentialen Kraft an der Honleiste F_{ht}) werden gemessen und somit der Tangentialkraftkoeffizient gemäß

$$\mu_h = \frac{F_t}{F_n} \quad (4.1)$$

ermittelt. Die Rotationsbewegung wird im Aufbau vom Werkstück durchgeführt, die Hub- und die Zustellbewegung vom Werkzeug. Der Prozess verläuft kraftgeführt, das heißt zugestellt wird bis ein vorgegebener Kraftwert erreicht ist. Dieser wird über den Prozess möglichst konstant gehalten. Vor Versuchsbeginn wurden die untersuchten Honleisten mit Hilfe von Schleifstiften an die Form des Werkstücks angepasst und aufgeraut. Dadurch ergeben sich gleiche Ausgangsbedingungen für die Versuche. Die Bereitstellung von Kühlschmierstoff erfolgt über einen externen Ölkreislauf; der Einsatz von verschiedenen Kühlschmierstoffen ist so einfach darstellbar.

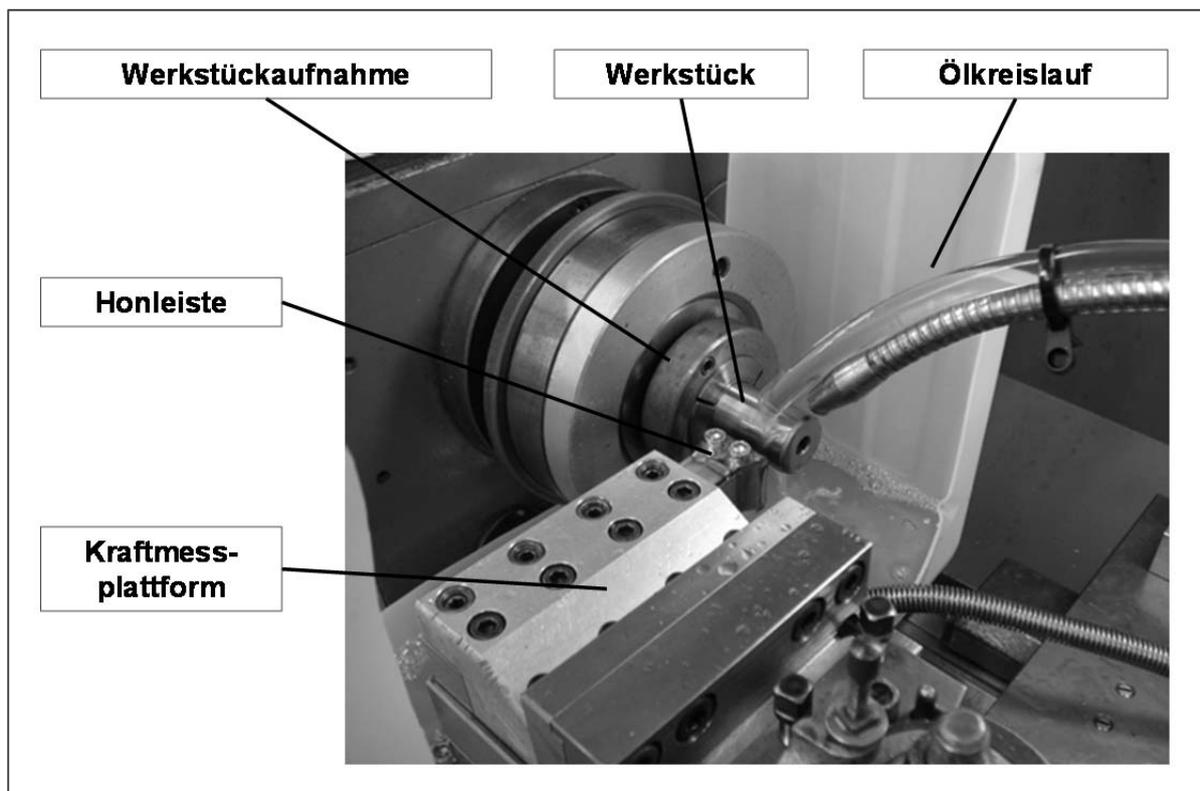


Abbildung 4.11: Messaufbau zur Bestimmung von Tangentialkraftkoeffizienten [ScBä13].

Der Tangentialkraftkoeffizient ist dabei „für definierte Kombinationen aus Honleiste, Werkstückstoff und Kühlschmierstoff nur von der Honleistenschärfe abhängig“ [HoMe04]. Ähnliche Vorgehensweisen zur Bestimmung von Reibwerten bzw. Tangentialkraftkoeffizienten wurden unter anderem bereits von Waninger [Wani52], Saljé [SaSe87] und Hoffmeister [HoMe04] beschrieben.

4.3.2 Messtechnik

Die Kräfte während des Prozesses werden mithilfe eines 3-Komponenten-Werkzeughalter-Dynamometers der Firma Kistler, Typ 9121, gemessen und über den Datenrekorder Genesis High Speed Gen 2i der Firma HBM aufgenommen. Die Kraftmessplattform misst mithilfe piezoelektrischer Sensoren. Die Messung in allen drei Raumrichtungen wird durch Übereinanderlegen schub- und druckempfindlicher Quarzscheiben erzielt. Abbildung 4.12 zeigt die aufgenommenen Signale und ihre Auswertung. Ein- und Ausfahranteile werden dabei nicht berücksichtigt.

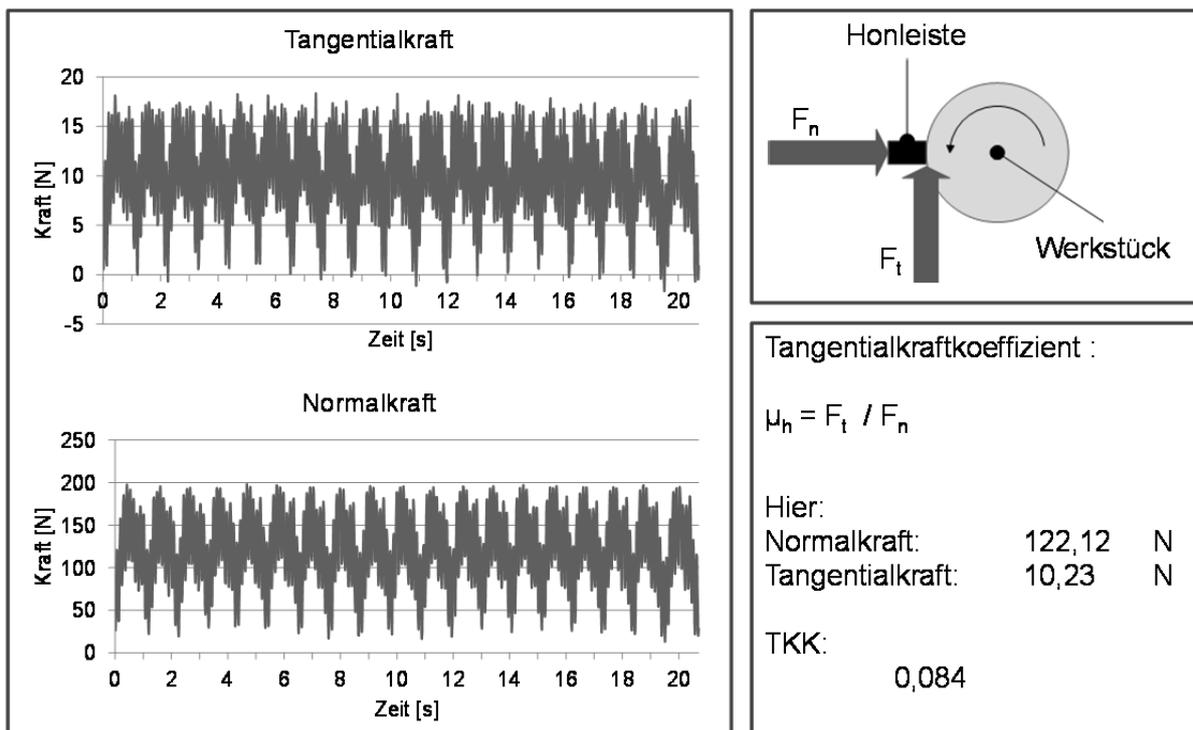


Abbildung 4.12: Aufgenommene Signale am Versuchsstand, Tangentialkraft F_t (oben), und Normalkraft F_n (unten).

4.3.3 Bedingungen und Ablauf

Die Versuche werden mit unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten und Vorgabewerten für die Normalkraft durchgeführt. Verwendet werden Honleisten, Werkstücke

und Kühlschmierstoffe entsprechend der Honversuche, die Parameter wurden ebenfalls entsprechend der Honversuche gewählt. Die einzelnen Versuche dauern jeweils 20s, vergleichbar den mit Standardparametern durchgeführten Honversuchen zum Innenrundhonen. Honleiste und Werkstück sind jeweils 20mm lang, ein entsprechender Überlauf für die Oszillationsbewegung ist gewählt. Die Versuchsbedingungen sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Versuchsbedingungen zur Bestimmung von Tangentialkraftkoeffizienten.

	Variation
Schnittgeschwindigkeit [m/min]	10, 15, 20
Normalkraft [N]	100, 150, 200
Kombination 1	Werkstück 16MnCr5 HRC60 (1.7131) Kadiol 50
Kombination 1.1	Honleiste B91/8014/8/50
Kombination 1.2	Führungsleisten D76/710/6/100
Kombination 2	Werkstück 16MnCr5 HRC20 (1.7131) Kadiol 90
Kombination 2.1	Honleiste D15/503/13/50
Kombination 2.2	Führungsleisten D10/710/6/100
Kombination 2.3	Hartmetall-Führungsleisten

5 Untersuchungen zum Honprozess

5.1 Der Honprozess

In Abbildung 5.1 ist ein typischer Honprozess, weggeführt mit Standardparametern für gehärtete Werkstücke (vgl. Tabelle 4.1), dargestellt. Der vollständige Prozess benötigt etwa 20s, der eigentliche Honprozess 15s. Das Honwerkzeug fährt zunächst in das Werkstück ein und beginnt am unteren Umkehrpunkt angekommen gleichzeitig mit Rotation, Oszillation und Zustellung. Die Zustellung erfolgt in insgesamt 40 Schritten von je $0,5\mu\text{m}$ um den Abtrag von insgesamt $20\mu\text{m}$ zu erreichen. Zwischen den einzelnen Zustellschritten wird jeweils eine Pausenzeit von $0,25\text{s}$ abgewartet, um dem System die Gelegenheit zum Abtrag und zum Druckabbau zu geben.

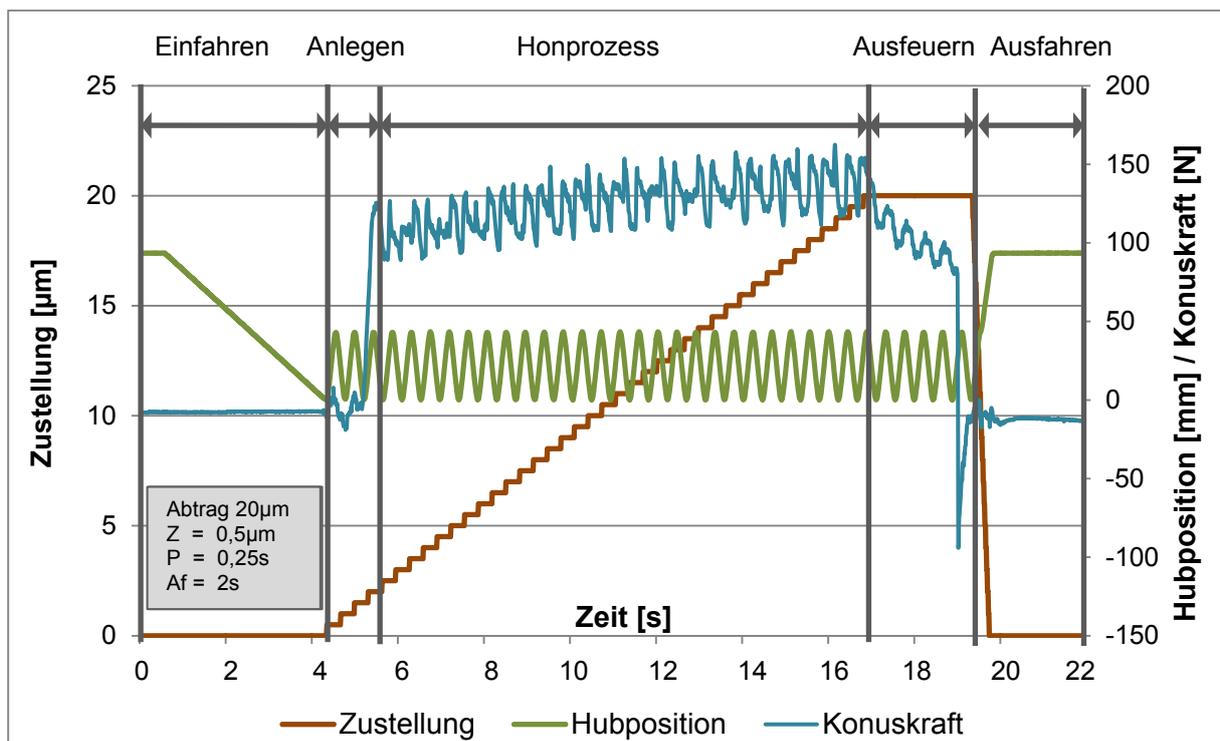


Abbildung 5.1: Phasen des Honprozesses.

Zu Beginn des Prozesses ist im Beispiel ein ungewünschter Effekt beim Anlegen erkennbar. Obwohl die Zustellung bereits einige Schritte getan hat, hat sich noch keine erkennbare Kraft aufgebaut. Das lässt sich darauf zurückführen, dass im vorliegenden Fall der Startpunkt der Zustellung nicht mit der Bohrungswand übereinstimmt. Zunächst wird also „in der Luft“ gehont (vgl. Abbildung 5.2). Schwanken die Bohrungsdurchmesser aus der Vorbearbeitung stark, kann dieser Effekt häufig vorkom-

men, bei gleichmäßig vorbereiteten Bohrungen lässt er sich durch entsprechende Anpassung der Startposition aber verhindern.

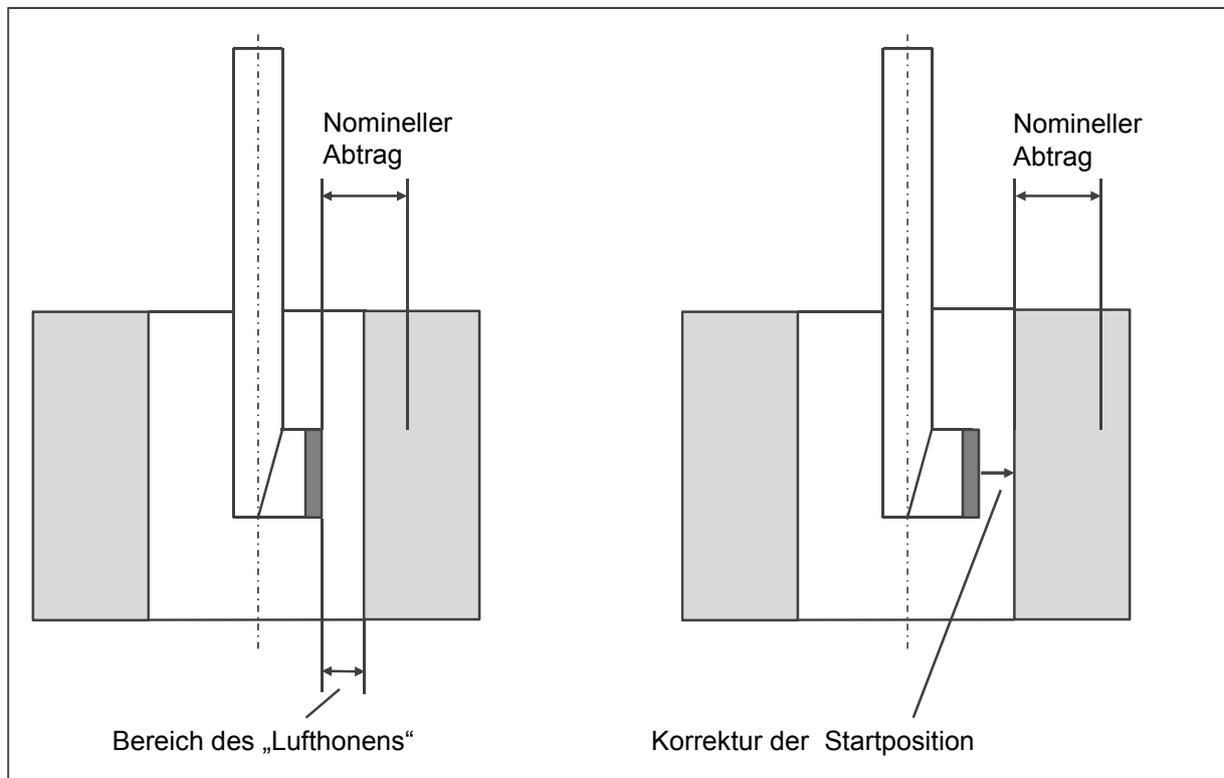


Abbildung 5.2: Die Anlegephase und deren Korrektur.

Nach der Anlegephase ist der eigentliche Honprozess mit stark schwankender, zum Ende hin steigender Konuskraft zu sehen. Die Zustellung schreitet kontinuierlich voran. Im Beispiel genügt die Pausenzeit von 0,25s offensichtlich nicht zum vollständigen Druckabbau, die Konuskraft steigt daher mit fortschreitender Zustellung immer weiter an. Durch die Hubbewegung verändert die Honleiste ihre Lage und damit auch die Kontaktlänge im Werkstück permanent. An den Umkehrpunkten wird die Kontaktlänge, also die Länge der Honleiste die zu einem bestimmten Zeitpunkt mit der Bohrungswand in Kontakt steht, minimal. Dadurch ist der Schneiddruck an diesen Stellen größer, da sich die radiale Kraft gegen die Bohrungswand nun auf eine kleinere Leistenfläche verteilt. Um dennoch Formfehler zu vermeiden muss der Hub daher genau auf die Bohrung abgestimmt sein. Abbildung 5.3 zeigt den Zusammenhang zwischen Hubbewegung und Kontaktlänge über zwei Hübe. Die Kontaktlänge ist im Beispiel relativ lange maximal, da die verwendete Leiste mit 20mm kürzer als die Bohrung mit 50mm ist. An oberem und unterem Umkehrpunkt wird sie minimal. Die letzte Phase des Prozesses ist das Ausfeuern. Während der Ausfeuerzeit, im vorliegenden Fall

2s, ist die Zustellung bereits abgeschlossen, Rotation und Oszillation werden aber weiter ausgeführt. Dadurch fällt die Konuskraft in dieser Phase stark ab, das System entspannt sich. Dies dient der weiteren Verbesserung der Oberfläche. Danach fährt das Werkzeug wieder aus dem Werkstück aus, der Prozess ist beendet.

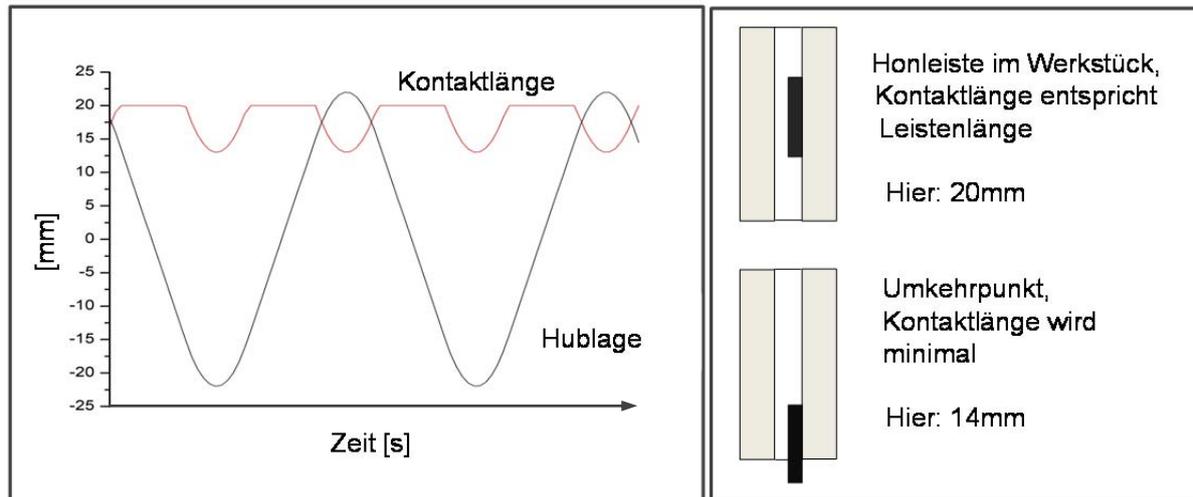


Abbildung 5.3: Zusammenhang zwischen Hublage und Kontaktlänge.

Zur Charakterisierung von Schleifprozessen werden verschiedene Kenngrößen definiert und verwendet [KIKö05], [Alth82], [Mush80]. Diese können auch auf Honprozesse übertragen werden [ViMO85], und sind im Folgenden kurz erläutert sowie auf den Beispielprozess unter Standardparametern übertragen. Das Zerspanungsvolumen V_w „beschreibt das zerspante Werkstückvolumen“ [KIKö05]. Beim Honen von Bohrungen ergibt es sich damit, ebenso wie beim Innenschleifen, zu:

$$V_w = \pi \cdot l_B \cdot (r_2^2 - r_1^2) \quad (5.1)$$

Im vorliegenden Beispiel mit einem Ausgangsdurchmesser von 7,98mm und einem Abtrag von 20µm auf einen Zieldurchmesser von 8,00mm ergibt sich mit einer Bohrungslänge von 50mm also ein Zerspanungsvolumen V_w von 12,55mm³. Das Zerspanungsvolumen wird in der Praxis „häufig auf die Breite des aktiven Schleifscheibenprofils bezogen, um eine von der Eingriffsbreite unabhängige Kenngröße zu erhalten und Versuchsergebnisse besser vergleichen zu können.“ [KIKö05] Für das Honen kann ein ähnlicher Wert berechnet werden, der das zerspante Volumen auf

die Leistenfläche bezieht [Haas80], [Pauk92]. Das bezogene Zerspanungsvolumen V'_w lässt sich damit für das Honen wie folgt definieren:

$$V'_w = \frac{V_w}{A_h} \quad (5.2)$$

Im Beispiel ergibt es sich über die Oberfläche der Honleiste A_h von 60mm^2 damit zu $0,209\text{mm}^3/\text{mm}^2$. Ein direkter Vergleich zum Schleifen ist hier aufgrund der unterschiedlichen Einheit nicht möglich. Dies ergibt sich, da beim Schleifen eine Linienberührung, beim Honen aber ein flächiger Eingriff vorliegt. Eine weitere wichtige Kenngröße ist das Zeitspannungsvolumen Q_w . Es ist definiert als das „je Zeiteinheit zerspannte Werkstoffvolumen, entspricht also dem Differentialquotienten von Zerspanungsvolumen und Zeit. Unter der Voraussetzung eines konstanten Zeitspannungsvolumens über die Zeit, erfolgt durch Integration

$$Q_w = \frac{dV_w}{dt} \rightarrow Q_w = \frac{V_w}{t_h} \quad (5.3)'' \quad [\text{KIKö05}]$$

Im Beispiel benötigt ein weggeführter Honvorgang unter Standardbedingungen $15,2\text{s}$, das Zeitspannungsvolumen Q_w liegt also bei $0,826\text{mm}^3/\text{s}$. Auch das Zeitspannungsvolumen wird beim Schleifen häufig auf die Eingriffsbreite bezogen und dann analog zum Zerspanungsvolumen als bezogenes Zeitspannungsvolumen Q'_w bezeichnet. Desweiteren wird beim Schleifen auch der Schleifscheibenverschleiß in Kenngrößen beschrieben, wichtig ist hier insbesondere das Verhältnis zwischen abgetragenem Werkstück- zu abgetragenem Werkzeugvolumen, das sogenannte Schleifverhältnis G .

$$G = \frac{V_w}{V_s} \quad (5.4).$$

Es dient als gängige Größe zur Beschreibung der Werkzeugstandzeit [KIKö05]. Eine Übertragung dieser Kenngröße auf den vorliegenden Honprozess ist aufgrund des nur sehr geringen Verschleißes der hochharten Honleisten in den Versuchen unter Laborbedingungen nicht sinnvoll. Unter den Bedingungen der Massenfertigung beziehungsweise bei der Verwendung schneller verschleißender Leisten kann eine solche Betrachtung aber durchaus sinnvoll sein. Werte für das Schleifverhältnis G kön-

nen beim Honen nach Pauksch zwischen $G < 1$ für das Honen mit keramisch gebundenen Honleisten und $G > 30000$ für das Honen mit Diamantkörnern liegen [Pauk92].

5.2 Weg- und kraftgeführtes Honen

In einem ersten Schritt sollen im Folgenden die beiden Varianten kraft- und weggeführtes Honen mit ihren Prozesskräften und Qualitätsergebnissen gegenübergestellt und verglichen werden. Die dargestellten Ergebnisse zeigen unter Verwendung der zuvor festgelegten Standardparameter (vgl. Tabelle 4.1) durchgeführte Versuchsreihen für das Honen von gehärtetem und weichem Stahl mit CBN- beziehungsweise Diamant-Honleisten. Gehont wurden jeweils 50 Teile pro Werkstoff, davon wiederum je 25 weggeführt und 25 kraftgeführt.

Abbildung 5.4 zeigt die Qualitätsergebnisse für das Honen von gehärtetem Stahl.

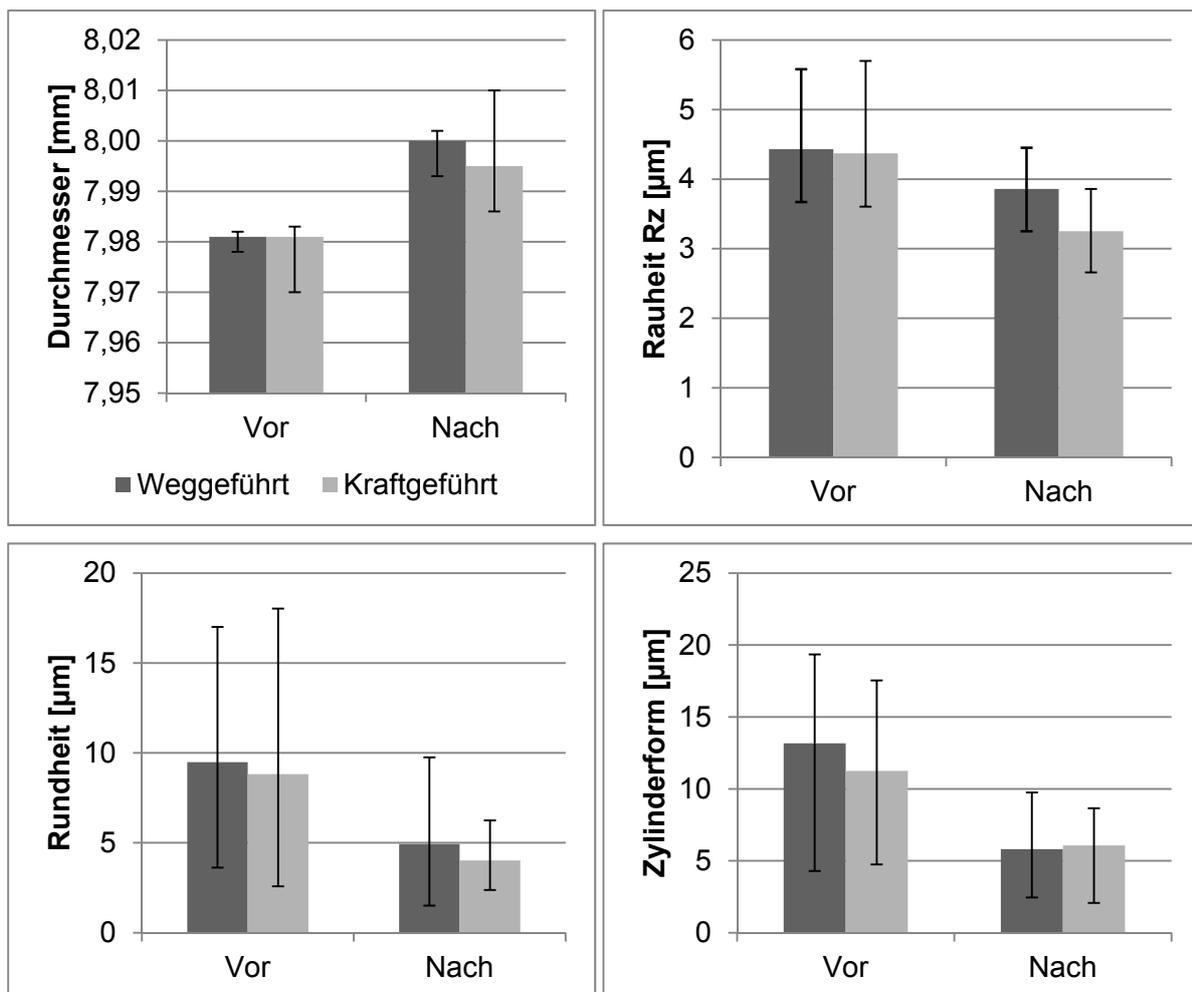


Abbildung 5.4: Durchmesser, Rauheit und Formergebnisse für das Honen von gehärtetem Stahl.

Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte für den weg- beziehungsweise kraftgeführten Fall im Ausgangszustand und nach der Honoperation, sowie die Streubalken. Die Prozesszeiten für den Honprozess liegen für den genau vorbestimmten weggeführten Prozess konstant bei 15,2s. Der kraftgeführte Prozess schwankt dagegen zwischen 9,6s und 46s, der Mittelwert liegt bei etwa 20s. Die Schwankungen treten auf, da die Zustellung beim kraftgeführten Prozess von der gemessenen Kraft abhängt. Die Differenz der Temperatur an der Honleiste, gemessen vor Beginn und direkt im Anschluss an den Honvorgang, betrug beim weggeführten Honen durchschnittlich 17°C, beim weggeführten nur 12°C. Wie erwartet sind die auftretenden Temperaturen generell niedrig, aufgrund der bei den kraftgeregelt gehonten Teilen tendenziell niedrigeren Kraftwerte und der damit geringeren umgesetzten Leistung lässt sich der geringer ausfallende Temperaturanstieg hier erklären. Die geringeren Kraftwerte erklären auch die besseren Rauheitswerte beim kraftgeführten Honen, durch die geringere Anpresskraft werden die Schneidkörner weniger tief in das Werkstückmaterial gedrückt. Die Streuung ist in beiden Fällen etwa gleich. Die Form der bearbeiteten Teile ist beim kraftgeregelten Honen ebenfalls etwas besser, wobei zu beachten ist, dass die Verbesserung der Form bei den durchgeführten Versuchen nicht im Vordergrund stand und durch die im Vergleich zur Bohrung mit 20mm recht kurzen Leisten nicht uneingeschränkt erfolgen kann. Die Formwerte waren im Ausgangszustand noch sehr schlecht, so dass der Abtrag von nur 20µm für eine vollständige Verbesserung nicht ausreicht. Betrachtet werden hier nur die wichtigsten Formmerkmale Rundheit und Zylinderform. Beide Verfahrensvarianten sind trotz der schlechten Vorbearbeitung in der Lage die Formwerte stark zu verbessern. Die Maßhaltigkeit der gehonten Bohrung ist beim weggeführten Honen etwas besser, auch die Streuung ist hier geringer. Dies ist mit den ungleichmäßigen Honzeiten beim kraftgeführten Honen zu begründen. Die zum Teil sehr langen Honzeiten führen hier zu großen Bohrungen. Beide Varianten ermöglichen insgesamt einen stabilen Prozessablauf ohne größere Probleme. Die folgende Abbildung 5.5 zeigt die Oberfläche eines Teiles vor beziehungsweise nach der Bearbeitung (links: vorher, rechts: nachher, weggeführter Prozess). Im linken Bildteil sind zunächst die Vorbearbeitungsspuren zu erkennen, die durch Bohren und Vorhonen entstanden sind. Nach der Bearbeitung durch das Fertighonen ist die typische Honstruktur mit sich unter dem Honwinkel kreuzenden Spuren zu erkennen. Die gemessenen Werte bestätigen wie erwartet die theoretischen

schen Honwinkel von etwa 42° . Unterschiede zwischen kraft- und weggeführtem Prozess in Bezug auf den Honwinkel lassen sich wie erwartet nicht feststellen.

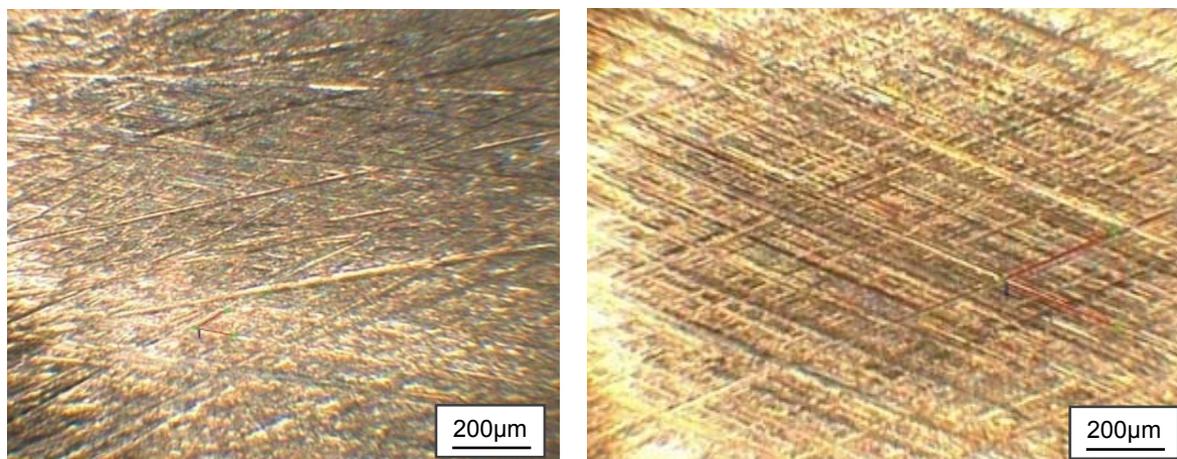


Abbildung 5.5: Honwinkel bei Standardparametern: Links Vorbearbeitungszustand, Rechts nach dem Honvorgang.

Die durchschnittlich auftretenden Mittelwerte für Axial- und Konuskraft sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

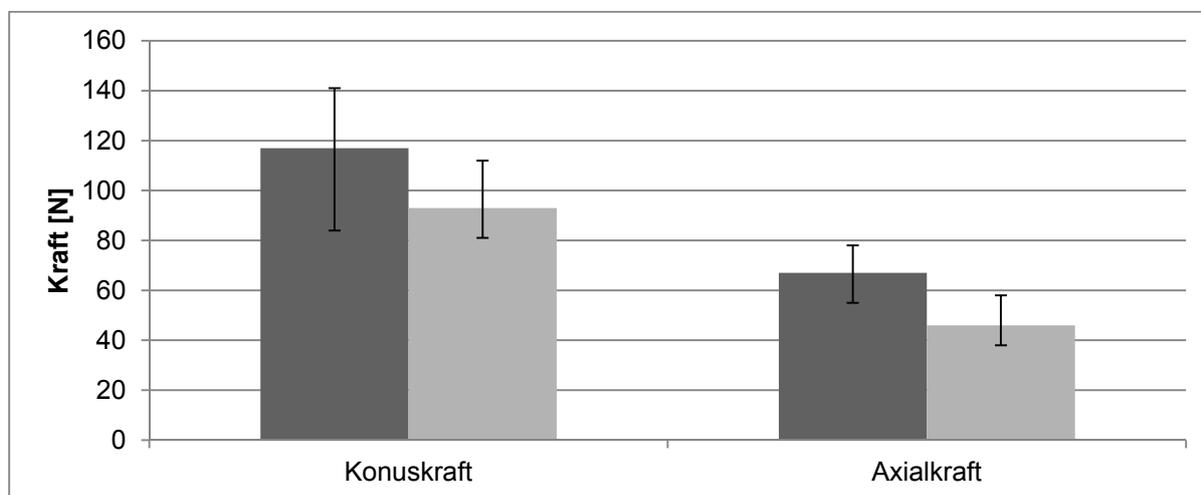


Abbildung 5.6: Konus- und Axialkraft für das Honen von gehärtetem Stahl.

Wie bereits oben erwähnt liegen die Werte insgesamt für das kraftgeführte Honen deutlich niedriger. Der vorgegebene Kraftwert von 90N wurde beim kraftgeführten Honen gut erreicht (Durchschnitt Konuskraft 93N). Beim weggeführten Honen stellt sich ein etwas höherer Kraftwert ein (Durchschnitt Konuskraft 118N). Die durchschnittliche Konuskraft streut beim weggeführten Honen außerdem etwas stärker.

Abbildung 5.7 zeigt qualitativ typische Kraftverläufe für das kraft- beziehungsweise weggeführte Honen. Dargestellt sind jeweils die unterhalb der Werkstückaufnahme gemessene Axialkraft (oben) sowie die mithilfe des internen Maschinensensors aufgenommene Konuskraft (unten). In beiden Signalen ist ein deutlicher Einfluss der Hubbewegung zu erkennen. Der kraftgeführte Verlauf zeigt ein deutlich glatteres Signal mit geringeren Kraftwerten und weniger Schwankungen. Der weggeführte Prozess zeigt, vor allem zu Beginn, deutlich höhere Kräfte, die sich im Laufe des Prozesses abbauen. Die Schwankungen sind hier deutlich höher. Der weggeführte Prozess ist etwas kürzer als der kraftgeführte.

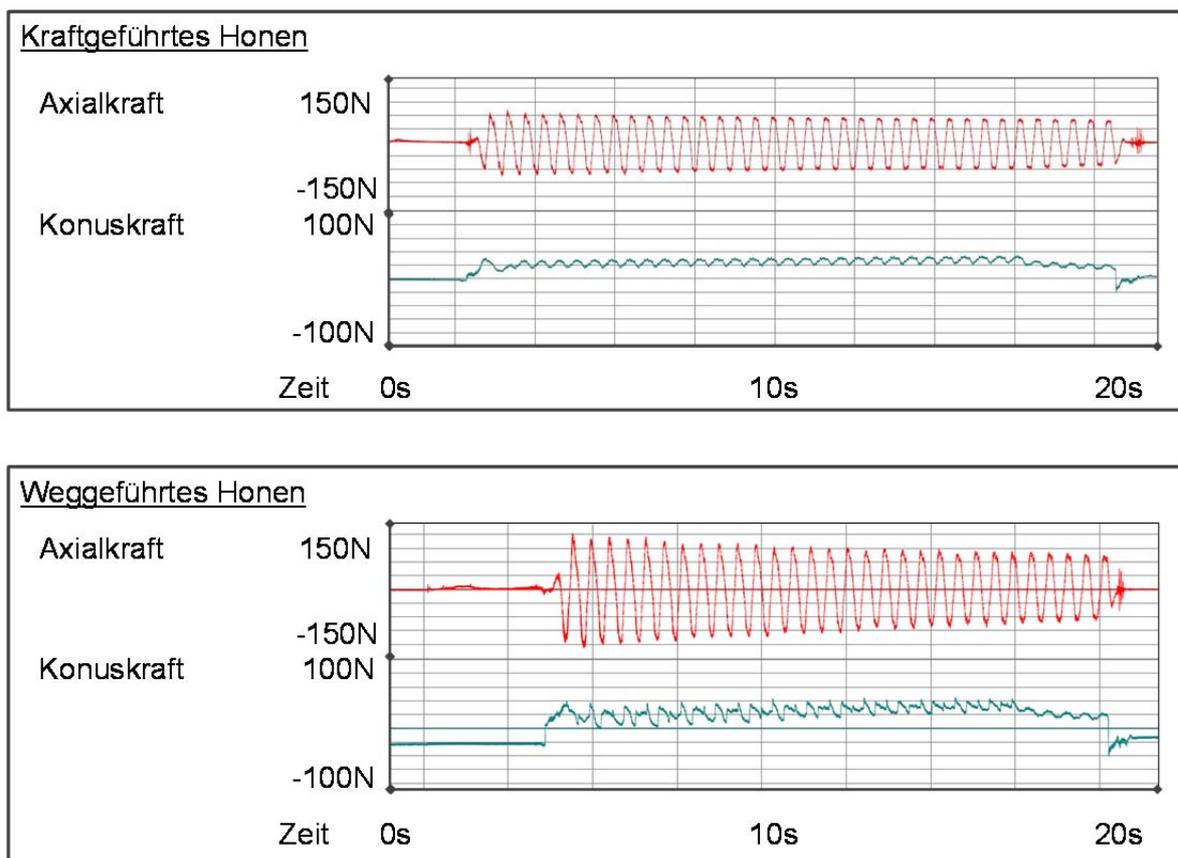


Abbildung 5.7: Vergleich von kraft- (oben) und weggeführtem Kraftverlauf (unten).

Abbildung 5.8 zeigt die Qualitätsergebnisse für das Honen von weichem Stahl. Die Bearbeitung wurde hier in zwei Schritte unterteilt, das grobe Vorhonen und das feinere Fertighonen. Das ist erforderlich, um den Abtrag von $20\mu\text{m}$ mit dem feinkörnigen Diamantwerkzeug zu erreichen. Die Prozesszeiten für den Fertighonprozess liegen für den genau vorbestimmten weggeführten Prozess konstant bei 12s.

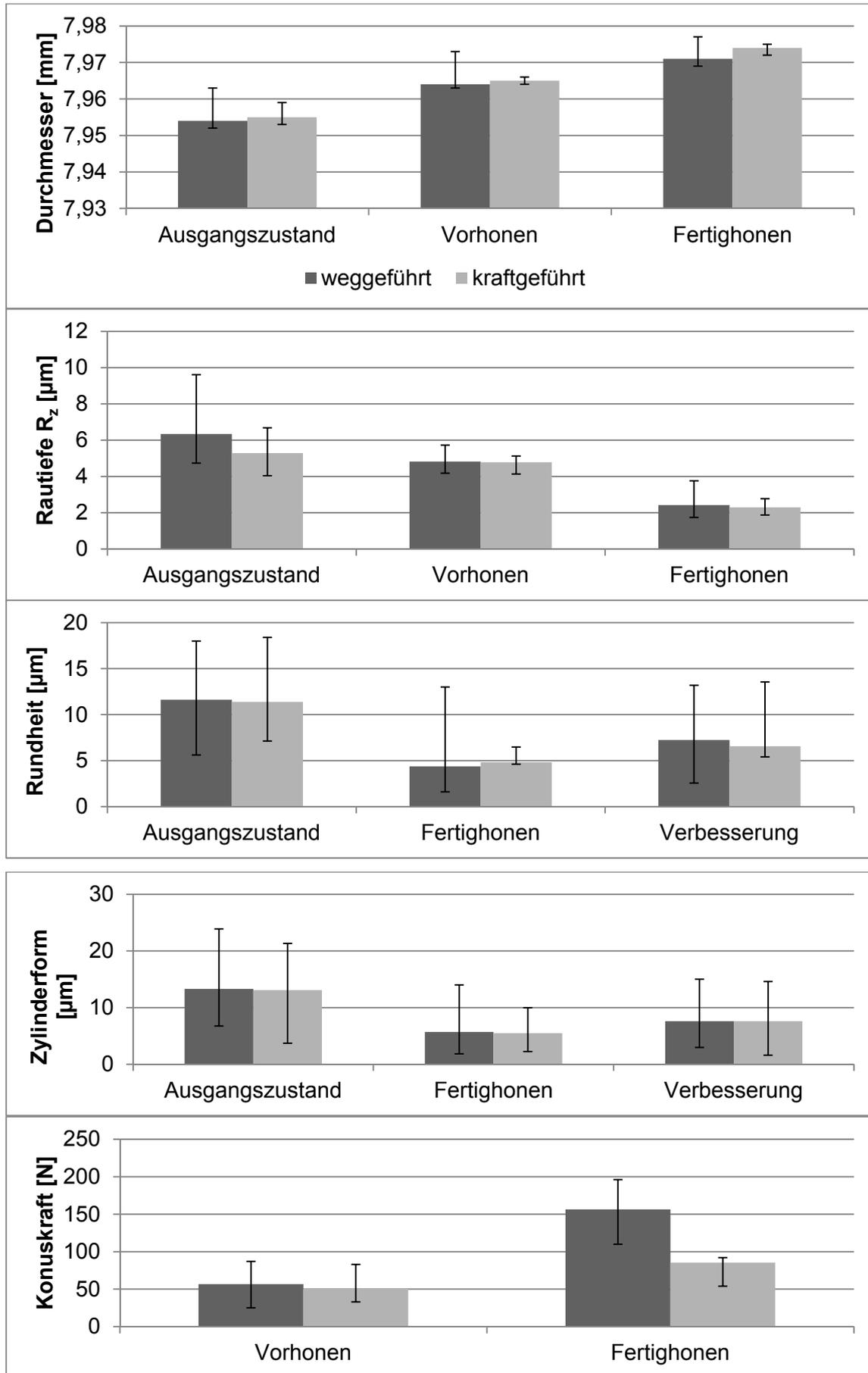


Abbildung 5.8: Durchmesser, Rauheit, Form und Konuskraft für das Honen von weichem Stahl.

Der kraftgeführte Prozess schwankt dagegen zwischen 16,6s und 30,7s, der Mittelwert liegt bei etwa 24s. Die kraftgeregelt gehonten Teile zeigen auch hier tendenziell niedrigere Kraftwerte und bessere Rauheitswerte. Die Verbesserung der Formfehler der bearbeiteten Teile ist bei beiden Verfahrensvarianten etwa gleich, das weggeführte Honen zeigt hier eine größere Streuung der Formwerte. Dabei ist zu beachten, dass die Verbesserung der Form bei den durchgeführten Versuchen auch hier nicht im Vordergrund stand und durch die im Vergleich zur Bohrung mit 20mm recht kurze Honleiste nicht uneingeschränkt erfolgen kann. Die Maßhaltigkeit der gehonten Bohrung ist beim kraftgeführten Honen etwas besser, auch hier streuen die kraftgeführten Werte weniger stark. Insgesamt sind hier bezüglich der Qualitätskenngrößen keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Verfahrensvarianten erkennbar, die Streuung fällt aber durchgängig bei den kraftgeführten Teilen etwas geringer aus. Zu beobachten ist während der weggeführten Versuche bei weichem Werkstoff ein Zusetzen der Honleiste. Dieser Effekt tritt bei der Bearbeitung weicher Werkstoffe recht häufig auf und kann zum Versagen der Honleiste, bei zu später Entdeckung zur Beschädigung des gesamten Werkzeugs, führen. Das Zusetzen ist eines der größten Probleme bei der Bearbeitung weicher Materialien durch Honen und bis heute nicht vollständig geklärt. Es handelt sich dabei wohl um ein Zusetzen der Honleisten mit Werkstückmaterial, diese werden daraufhin schneidunfähig. Dieser Effekt tritt eigenen Untersuchungsergebnissen zufolge bei zu hohen Kraftwerten während des Honprozesses auf. Das kraftgeführte Honen mit seinen niedrigeren Kräften kann dazu beitragen das Zusetzen der Leisten zu verhindern und ist außerdem in der Lage, bereits zugesetzte Leistenoberflächen wieder freizubekommen und die Selbstschärfung zu ermöglichen. Dieser Effekt ist während der durchgeführten Versuche mehrfach aufgetreten. Die verwendete Honleiste verfügt über Diamantkörner in metallischer Sinterbindung. Im funktionsfähigen Zustand sind auf der Oberfläche dunkle Schneidkörner und Bindungsbereiche, die abwechselnd silbern und messingfarben erscheinen. Während der Versuche werden mit dieser Honleiste zunächst 25 Teile weggeführt gehont, danach war die Leiste deutlich zugesetzt (vgl. Abbildung 5.9 links). Die gesamte Leistenoberfläche ist mit Werkstückmaterial überzogen. Nach der darauffolgenden Bearbeitung von 25 Teilen kraftgeführt war die Leiste wieder frei und schneidfähig (vgl. Abbildung 5.9 rechts). Abbildung 5.9 zeigt die Leistenoberfläche jeweils unter dem Laserscanningmikroskop. Das kraftgeführte Honen kann also ein Lösungsansatz für das Problem des Zusetzens sein. Weitere Ansätze können ange-

passte Parameter für das weggeführte Honen sein, die niedrigere Prozesskräfte ermöglichen. Daneben könnten periodisch auftretende Reinigungsvorgänge, etwa ein paar kraftgeführte Vorgänge nach jeweils 20 Teilen oder eine mechanische Reinigung ähnlich dem Abrichten, Abhilfe schaffen.

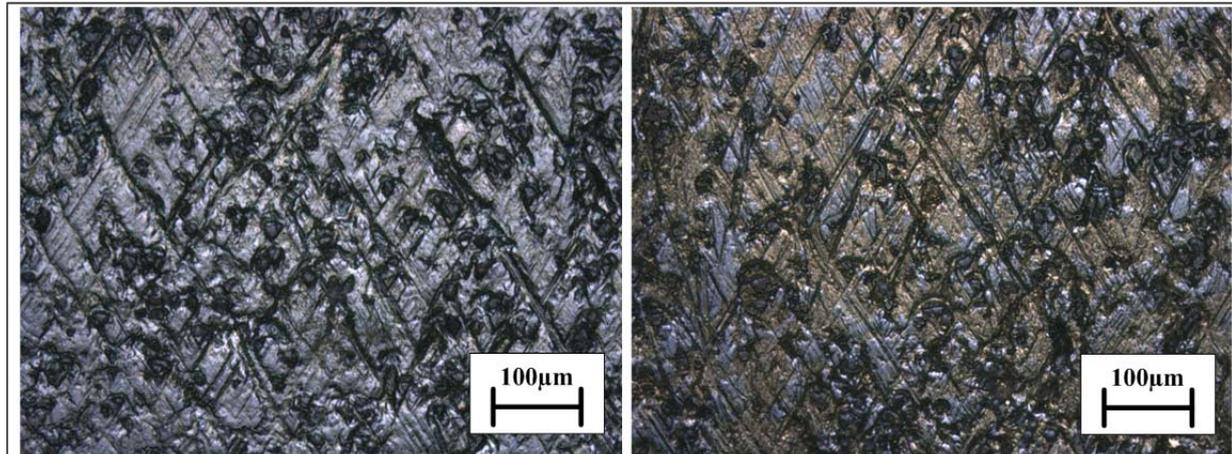


Abbildung 5.9: Honleiste mit Diamantkörnern in metallischer Sinterbindung links zugesetzt nach weggeführter Bearbeitung, rechts freigeschnitten nach anschließender kraftgeführter Bearbeitung.

Die obigen Versuche zeigen das Potential des kraftgeführten Honens auf. Dazu gehören:

- Gleichmäßigere Belastung von Werkzeug und Werkstück durch geringere und gleichmäßigere Prozesskräfte
- Geringerer Verschleiß am Werkzeug
- Besseres Arbeitsergebnis (Form, Maß und Oberfläche) mit geringeren Streuungen
- Schnellere Einlaufzeiten möglich
- Freischneideffekt durch das kraftgeführte Honen, Vermeiden des Zusetzens insbesondere bei der Bearbeitung weicher Werkstoffe

Dennoch ist das weggeführte Honen derzeit in der Industrie weit verbreiteter Standard. Das kraftgeführte Honen wird dagegen kaum industriell eingesetzt. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen ist die schwankende Prozesszeit für eine Serienbearbeitung problematisch. Außerdem spielt der Vorteil der kürzeren Einlaufzeit in der Serienfertigung nur eine untergeordnete Rolle. Für diese lässt sich über eine genaue Einstellung der Parameter des weggeführten Prozesses ebenfalls ein gutes Ergebnis

bezüglich der Qualität erreichen. Der Einstellaufwand ist ab einer bestimmten Losgröße gerechtfertigt. Daneben hat das kraftgeführte Honen in der heutigen Form auch seine Probleme. Das größte ist die indirekte Kraftmessung oberhalb der Aufweitstange, das Kraftsignal ist aufgrund dessen fehlerbehaftet. Eine einfache Bereinigung der Hubbewegung besteht darin, nur einen Messpunkt pro Hub auszuwerten. Das macht jedoch die Regelung langsam und unzuverlässig. Eine Lösung dieser Probleme kann entweder in einer direkten Messung der Kraft von der Honleiste auf die Bohrungswand bestehen oder in der genauen Kenntnis der Kraftverhältnisse im System, was durch eine Modellerstellung realisiert werden kann.

5.3 Einfluss verschiedener Parameter auf den Honprozess

Erste Untersuchungen zum weggeführten Honen haben keinen Einfluss von radialem oder axialem Leistenspiel auf die Versuchsergebnisse oder die auftretenden Kräfte gezeigt. Auch der Konuswinkel des Honwerkzeugs hat keinen signifikanten Einfluss auf den Honprozess. [BäSc10]

Weitere Untersuchungen werden für das weg- und kraftgeführte Honen von weichem Werkstoff unter Verwendung von Diamanthonleisten durchgeführt (vgl. Standardparameter in Tabelle 4.1). Zunächst wird dabei die Pausenzeit, also die Zeit zwischen den einzelnen Zustellschritten beim weggeführten Honen, variiert. Wie in Abbildung 5.10 dargestellt, zeigt die recht hohe Pausenzeit von 0,75s die besten Rauheitswerte mit nur sehr geringen Streuungen.

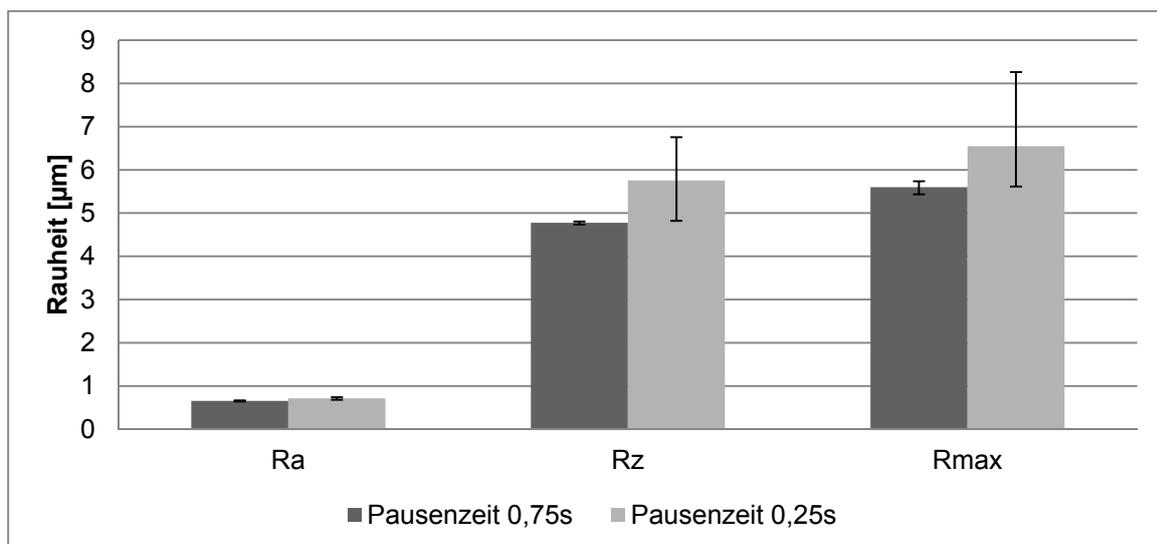


Abbildung 5.10: Einfluss der Pausenzeit auf die Rauheit beim Honen.

Dem System wird hier genug Zeit gegeben, das Werkstückmaterial abzutragen, es kommt zu keinen Verspannungen. Bei einer Pausenzeit von 0,25s liegen die Rauheitswerte erwartungsgemäß deutlich höher, auch die Streuungen sind ausgeprägter. Dies lässt sich mit den hier höheren Kräften und stärkeren Verspannungen im System erklären.

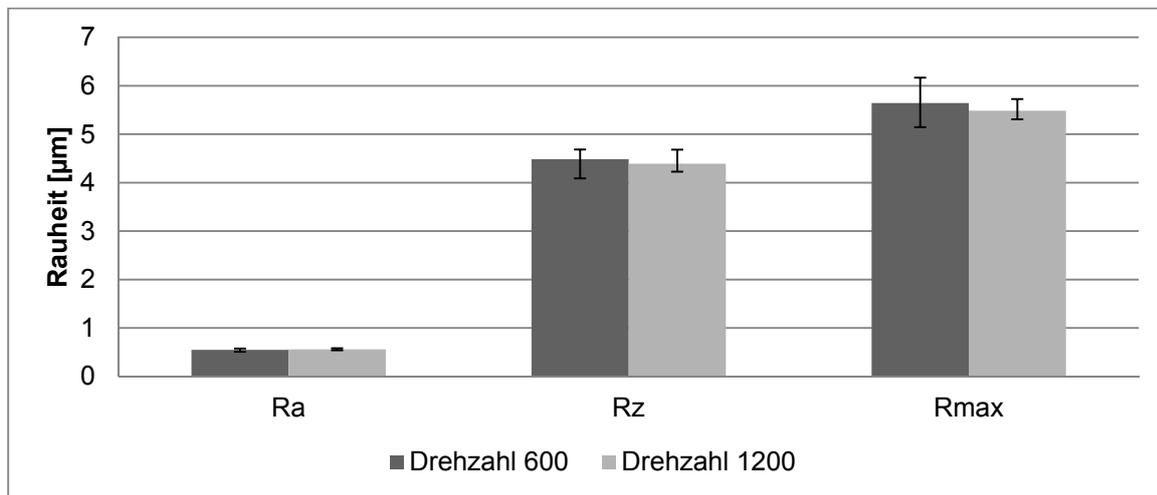


Abbildung 5.11: Einfluss der Drehzahl auf die Rauheit beim Honen.

Abbildung 5.11 zeigt den Einfluss verschiedener Drehzahlen auf die Rauheitsergebnisse beim weggeführten Honen. Gewählt wurden mit 600U/min ein recht niedriger und mit 1200U/min ein recht hoher Wert für die Drehzahl. Die Ergebnisse zeigen keine signifikante Abhängigkeit der Rauheitsergebnisse von der Drehzahl. Dies bestätigt vorangegangene Studien zu anderen Werkstoff – Honleisten – Kombinationen.

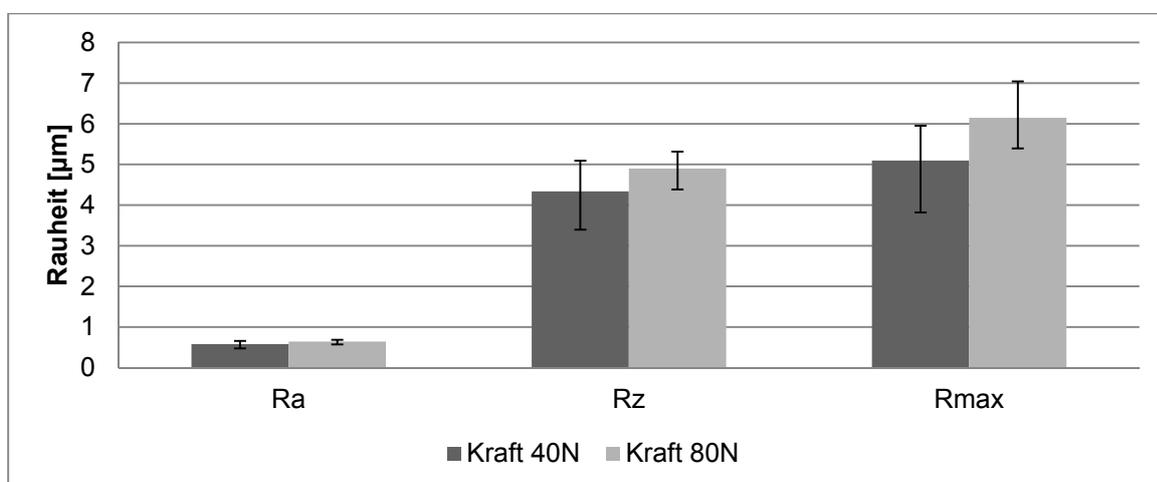


Abbildung 5.12: Einfluss der Vorgabewerte auf die Rauheit beim kraftgeführten Honen.

Abbildung 5.12 zeigt Rauheitsergebnisse für das kraftgeführte Honen. Gearbeitet wurde mit verschiedenen Vorgabewerten für die Prozesskraft von 40N und 80N. Die Rauheitswerte liegen für höhere Kraftwerte ebenfalls höher. Die höheren Kräfte bedingen höhere Anpressdrücke und damit ein tieferes Eindringen der Schneidkörner in die Oberfläche. Die Oberfläche wird dadurch rauer.

5.4 Kräfteverhältnisse am Werkzeugumfang

Abbildung 5.13 zeigt die Kräfte am Umfang eines Einleisten-Honwerkzeugs, die an der Honleiste und den beiden Führungsleisten auftreten. Mit diesen kann das Drehmoment M um das Werkzeug berechnet werden. Dieses kann während des Honprozesses unterhalb der Werkstückaufnahme gemessen werden.

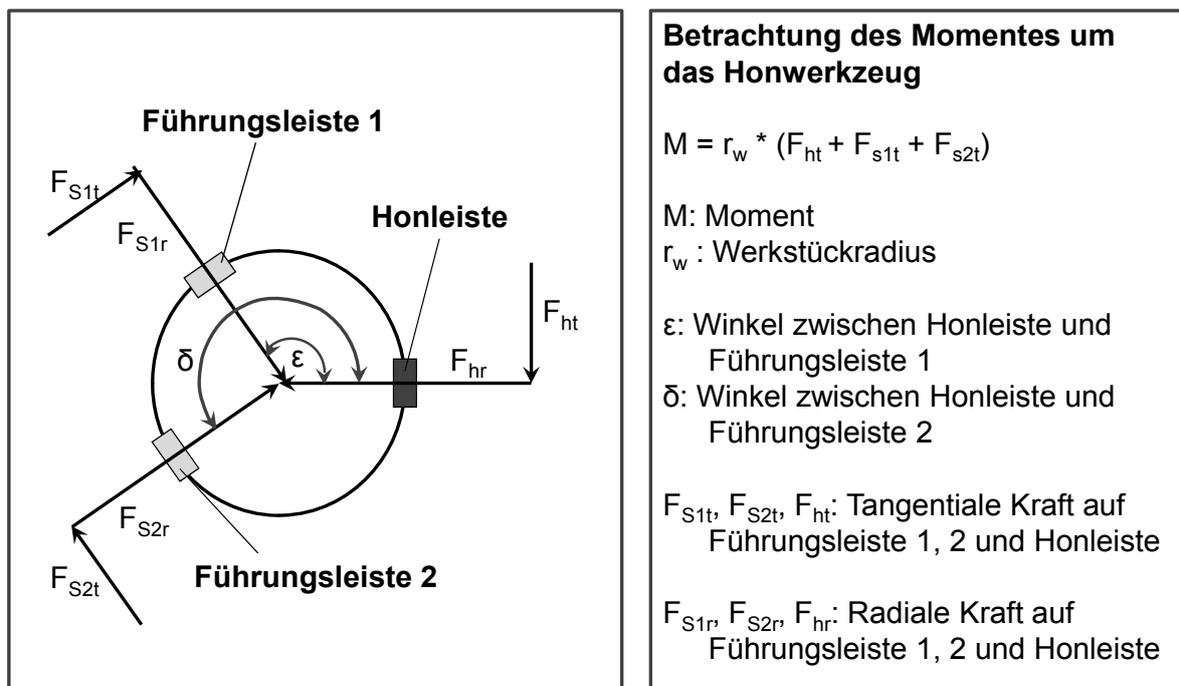


Abbildung 5.13: Kräfteverhältnisse am Umfang des Honwerkzeugs [ScBä13].

Das Drehmoment folgt mit der Tangentialkraft F_{ht} an der Honleiste, den Tangentialkräften F_{s1t} und F_{s2t} an den Führungsleisten und dem Werkstückradius r_w zu:

$$M = r_w \cdot (F_{ht} + F_{s1t} + F_{s2t}) \quad (5.5)$$

Die tangentialen Kraftkomponenten F_{ht} , F_{s1t} und F_{s2t} stehen in einem bestimmten Verhältnis zu den radialen Kraftkomponenten F_{hr} , F_{s1r} und F_{s2r} . F_{hr} wiederum kann

unter Verwendung der Werkzeuggeometrie als eine Funktion der Konuskraft F_k berechnet werden. Wie vorangegangene Studien belegen gibt es eine proportionale Beziehung zwischen F_{ht} und F_{hr} [Wani52], [SaSe87], [HoMe04]. Dieses Verhältnis zwischen tangentialer Kraft F_t und radialer Kraft F_n an der Honleiste wurde von Waninger [Wani52] als Reibwert μ und von Saljé und von See [SaSe87] als Tangentialkraftkoeffizient μ_t bezeichnet. Ein ähnliches Konzept ist auch vom Schleifen her bekannt, hier wird das Verhältnis Schnittkraftkoeffizient μ genannt [Stef83], [Vits85]. Typische Werte für den Koeffizienten liegen nach der Zusammenfassung von Paulmann für das Schleifen zwischen 0,2 und 0,7 [SaLa89], für das Honen zwischen 0,1 und 0,5 [vSee89] und für das Läppen zwischen 0,1 und 0,6 [Paul91]. Der Koeffizient wird im Folgenden als Tangentialkraftkoeffizient μ_h an der Honleiste bzw. μ_{s1} und μ_{s2} an den beiden Führungsleisten bezeichnet. Der konstante Koeffizient wird für eine bestimmte Kombination von Honleiste, Werkstück und verwendetem Kühlschmierstoff nur durch den Zustand der Honleiste beeinflusst [HoMe04].

$$\mu_h = \frac{F_t}{F_n} = \frac{F_{ht}}{F_{hr}} \quad (5.6)$$

Mit Hilfe des Tangentialkraftkoeffizienten μ_h gilt für die Honleiste:

$$F_{ht} = \mu_h \cdot F_{hr} \quad \text{mit} \quad F_{hr} = f(F_k, \text{Werkzeuggeometrie}, \mu) \quad (5.7)$$

Dasselbe kann für die Führungsleisten angenommen werden.

$$F_{s1t} = \mu_{s1} \cdot F_{s1r} \quad \text{und} \quad F_{s2t} = \mu_{s2} \cdot F_{s2r} \quad (5.8)$$

Wenn, wie bei Honwerkzeugen üblich zwei gleiche Stützleisten verwendet werden, kann $\mu_{s1} = \mu_{s2} = \mu_s$ angenommen werden. Das Drehmoment ergibt sich damit zu:

$$M = r_w \cdot (\mu_h \cdot F_{hr} + \mu_s \cdot F_{s1r} + \mu_s \cdot F_{s2r}) \quad (5.9)$$

F_{s1r} und F_{s2r} können über das Kräftegleichgewicht am Honwerkzeug (vgl. Abbildung 5.13) unter der Annahme einer kardanisch gelagerten Werkstückaufnahme (keine Querkräfte) ermittelt werden.

Dabei gilt in horizontaler Richtung (5.10):

$$F_{hr} = -F_{s1r} \cdot \cos(\varepsilon) + F_{s1t} \cdot \sin(\varepsilon) - F_{s2r} \cdot \cos(\delta) + F_{s2t} \cdot \sin(\delta)$$

Und in vertikaler Richtung (5.11):

$$F_{ht} = -F_{s1r} \cdot \sin(\varepsilon) - F_{s1t} \cdot \cos(\varepsilon) - F_{s2r} \cdot \sin(\delta) - F_{s2t} \cdot \cos(\delta)$$

Löst man die beiden Formeln (5.10) und (5.11) nach F_{s1r} und F_{s2r} auf und setzt die Ergebnisse in (5.9) ein, so lässt sich das Drehmoment in Abhängigkeit von der radialen Kraft an der Honleiste berechnen gemäß:

$$M = \Psi \cdot F_{hr} \quad (5.12)$$

Der Momentenkoeffizient Ψ ist dabei abhängig von den Tangentialkraftkoeffizienten von Hon- und Stützleisten μ_{s1} , μ_{s2} und μ_h , dem Durchmesser des Werkstücks r_w sowie den Geometriegrößen des Werkzeugs ε und δ . Der Momentenkoeffizient berechnet sich dabei gemäß (5.13) zu:

$$\Psi = \frac{r_w \cdot (a \cdot (\cos(\varepsilon) \cdot \sin(\delta) - \sin(\varepsilon) \cdot \cos(\delta)) + b \cdot (\cos(\varepsilon) - \cos(\delta)) + c \cdot (\sin(\varepsilon) - \sin(\delta)))}{(1 + \mu_s^2) \cdot (\cos(\varepsilon) \cdot \sin(\delta) - \sin(\varepsilon) \cdot \cos(\delta))} \quad (5.13)$$

Dabei sind

$$a = \mu_h + \mu_h \cdot \mu_s^2 \quad (5.14)$$

$$b = \mu_s^2 - \mu_h \cdot \mu_s \quad (5.15)$$

$$c = \mu_s + \mu_h \cdot \mu_s^2 \quad (5.16).$$

5.5 Bestimmung von Modellparametern

Um ein entsprechend der Formel (5.12) berechnetes Drehmoment mit einem gemessenen Momentenverlauf vergleichen zu können, müssen zunächst die fehlenden Parameter (μ_{s1} , μ_{s2} , μ_h , r_w , δ und ε) ermittelt werden. δ und ε beschreiben die Geometrie des verwendeten Werkzeugs und sind daher bekannt. Mit der Geometrie des Werkstücks ist auch r_w bekannt. μ_h , μ_{s1} und μ_{s2} dagegen müssen bestimmt werden. Der Versuchsaufbau, die Versuchsbedingungen und die Messtechnik zur Bestimmung

von Tangentialkraftkoeffizienten wurden bereits in Kapitel 4.3 erläutert. Im Folgenden sollen die entsprechenden Ergebnisse dargestellt und diskutiert werden.

Abbildung 5.14 stellt zunächst die Tangentialkraft in Abhängigkeit der gewählten Normalkraft für die gehärteten Werkstücke dar (Kombination 1.1, vgl. Tabelle 4.3). Die eingestellte Normalkraft lag bei 100N, 150N und 200N, die sich ergebenden Drücke bei $1,67\text{N/mm}^2$, $2,50\text{N/mm}^2$ und $3,33\text{N/mm}^2$.

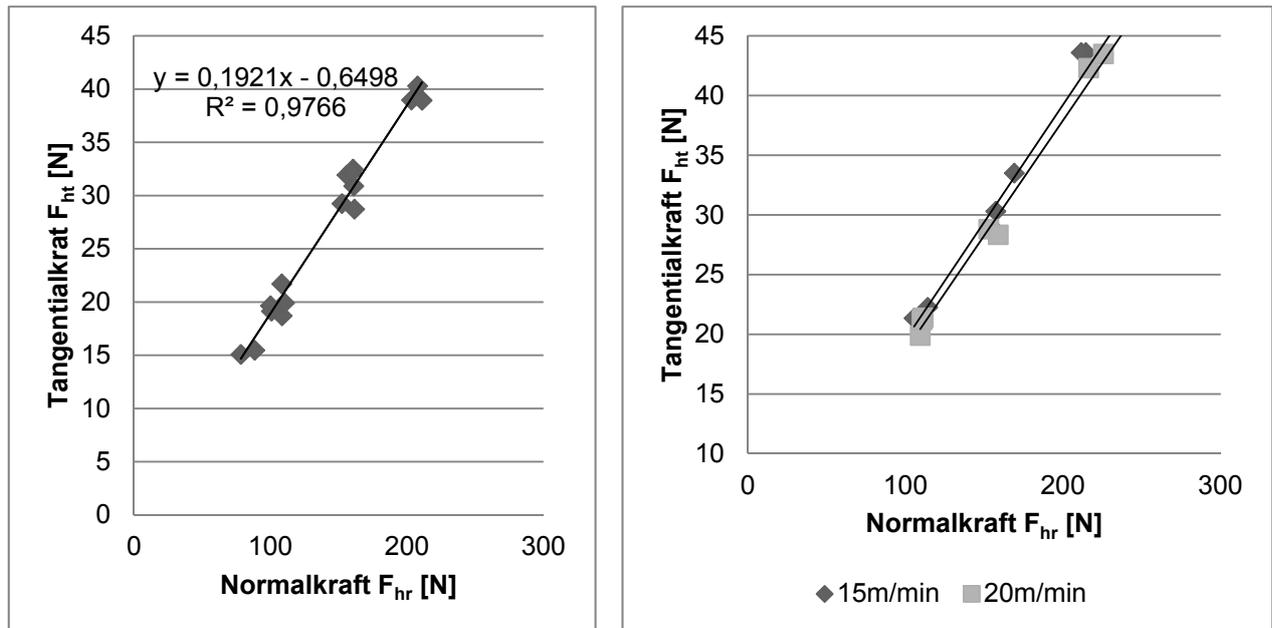


Abbildung 5.14: Tangentialkraftkoeffizienten für eine Schnittgeschwindigkeit von 10m/min (links) und Schnittgeschwindigkeiten von 15m/min und 20m/min (rechts) [ScBä13].

Die Linie in Abbildung 5.14 links kann angenähert werden als:

$$F_{ht} = d + e \cdot F_{hr} \quad (5.17)$$

mit $d = 0,6498\text{N}$ und $e = 0,1921$. Die lineare Regression hat ein Bestimmtheitsmaß von 0,9766. Da e im Verhältnis zu den Kräften im Honprozess vernachlässigbar klein ist, kann Formel (5.17) vereinfacht werden zu:

$$F_{ht} = \mu_h \cdot F_{hr} \quad (5.18)$$

mit dem Tangentialkraftkoeffizient μ_h an der Honleiste. Im vorliegenden Fall beträgt μ_h also 0,1921, für die gewählte Kombination aus Honleiste, Werkstückstoff und Kühlschmierstoff. Abbildung 5.14 zeigt die rechts die Ergebnisse für höhere Schnitt-

geschwindigkeiten von 15m/min und 20m/min. Die Normalkraft wurde wieder zwischen 100N, 150N und 200N variiert. Offensichtlich hat die Variation der Schnittgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf den Tangentialkraftkoeffizient, er ist wie erwartet von der Schnittkraft unabhängig. Dies bestätigt frühere Studien zum Thema [vSee89], [Berg90], [HoMe04], in denen das Verhalten von Honleisten mit Diamantkörnern auf Grauguss untersucht wurde. Desweiteren zeigte sich eine leichte Tendenz zu kleiner werdenden Tangentialkraftkoeffizienten beim Durchführen mehrerer Versuchsdurchgänge ohne erneutes Aufschärfen der Honleiste. Dies kann dadurch erklärt werden, dass die Honleiste ihre Schärfe verliert und abstumpft, wie ebenfalls in den Experimenten von [SaSe87] und [vSee89] gezeigt wurde.

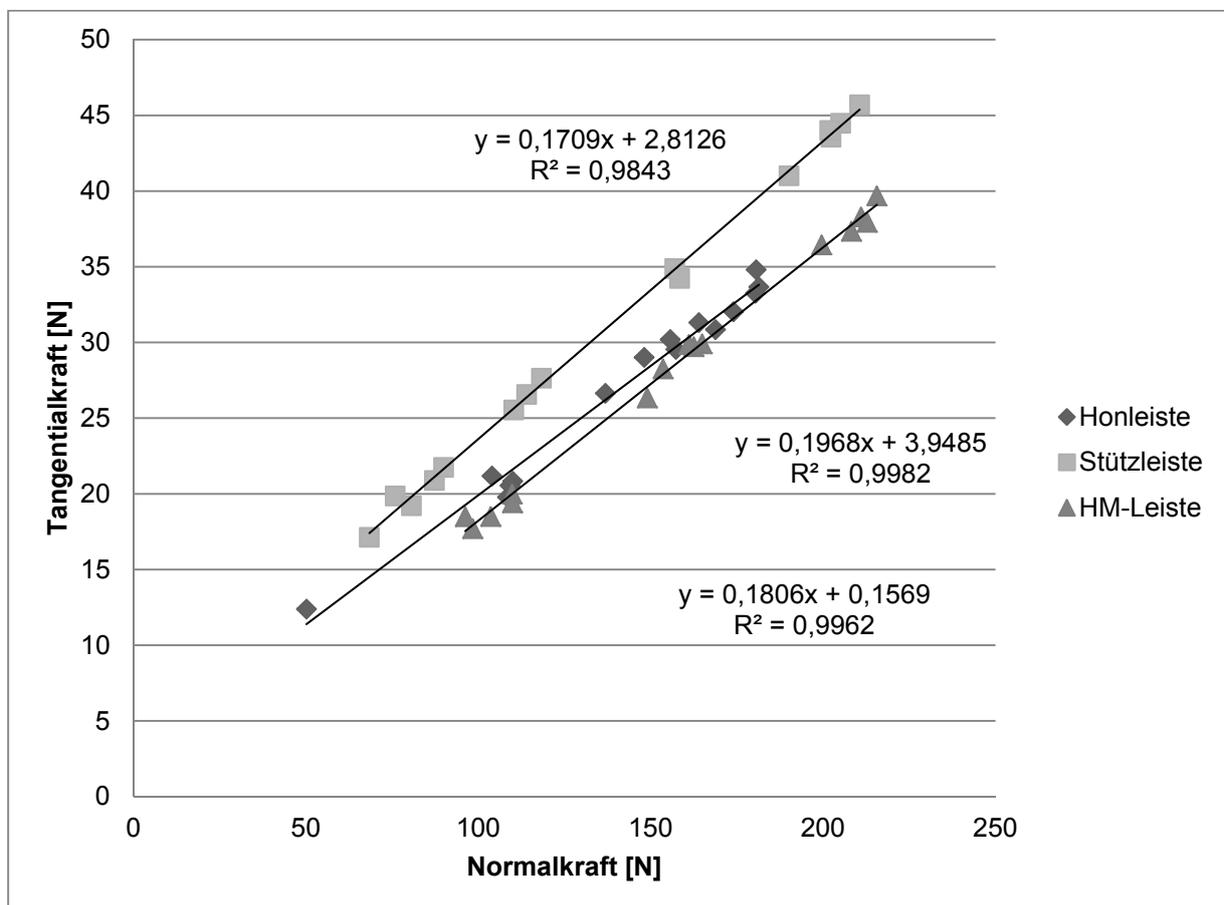


Abbildung 5.15: Tangentialkraftkoeffizienten für unterschiedliche Leisten unter Verwendung eines ungehärteten Stahls und des Honöls Kadiol 90.

Weitere Versuche werden zur Bestimmung der Tangentialkraftkoeffizienten für die verschiedenen Kombinationen zur Bearbeitung von ungehärtetem Stahl durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen für die Verwendung einer Diamant-Honleiste (vgl. Tabelle 4.3, Kombination 2.1) einen Tangentialkraftkoeffizient von 0,19, für Diamant-

Führungsleisten (Kombination 2.2) einen Wert von 0,23 und für alternativ eingesetzte Hartmetalleisten (Kombination 2.3) einen Wert von 0,18 (vgl. Abbildung 5.15). Die Ergebnisse der Untersuchungen zu den Tangentialkraftkoeffizienten sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst:

Tabelle 5.1: Ermittelte Tangentialkraftkoeffizienten.

Kombination	Tangentialkraftkoeffizient
Kombination 1	Werkstück 16MnCr5 HRC60 (1.7131) Kadiol 50
Kombination 1.1	0,192
Kombination 1.2	0,101
Kombination 2	Werkstück 16MnCr5 HRC20 (1.7131) Kadiol 90
Kombination 2.1	0,190
Kombination 2.2	0,230
Kombination 2.3	0,180

6 Eignung verschiedener Modelle zur Beschreibung der Kräfteverhältnisse an der Honleiste

Jeder Versuch die Realität durch ein Modell abzubilden, ist zwangsläufig fehlerbehaftet. Getreu dem Motto „so genau wie nötig, so einfach wie möglich“ sollen im Folgenden verschiedene Modelle für die im Honprozess wirkenden Kräfte vorgestellt und untersucht werden. Grundlage ist das Honen mit einem Einleistenwerkzeug, das mit einer Hon- und zwei Führungsleisten ausgestattet ist. Die Modelle lassen sich aber grundsätzlich auch auf Mehrleistenwerkzeuge übertragen.

6.1 Geometrisches Basismodell

6.1.1 Erstellung des Modells

Abbildung 6.1 zeigt das einfache geometriebasierte Modell der Kraftübertragung von Zustellstange zu Honleiste, wie es beispielsweise von Flores [Flor92] und Pauksch [Pauk92] beschrieben wurde. Berücksichtigt sind hierbei nur die geometrischen Übertragungsverhältnisse, Reibungsanteile, Gewichtskräfte und Bewegungen werden vernachlässigt. Außerdem werden alle Bauteile des Werkzeugs als ideal steif angenommen.

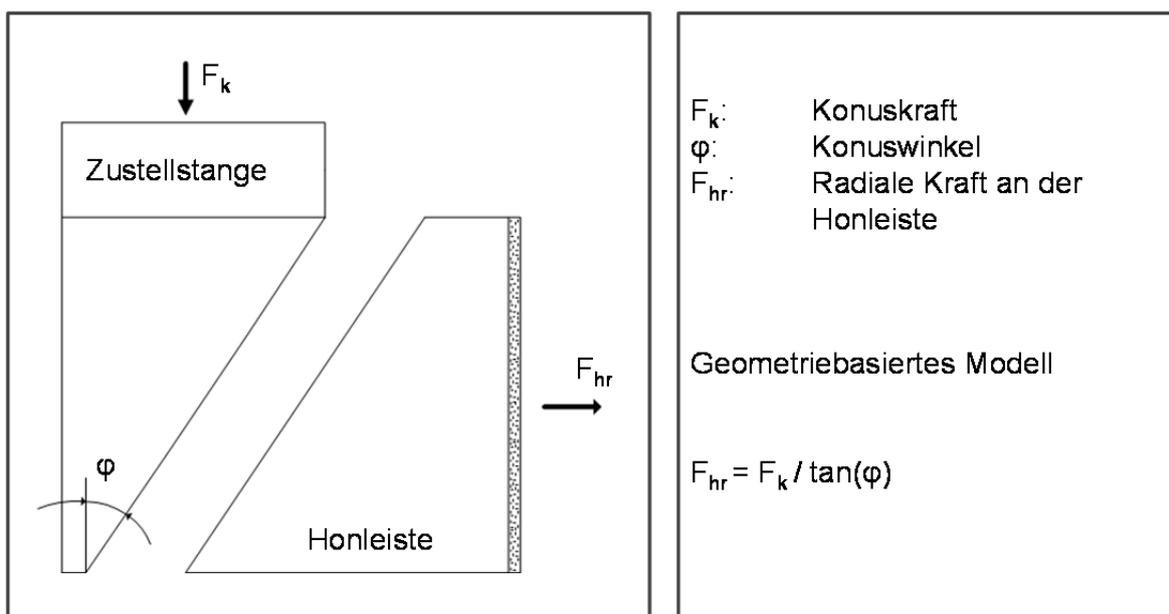


Abbildung 6.1: Geometrisches Basismodell

Der Zusammenhang zwischen Konuskraft F_k und radialer Kraft auf die Honleiste F_{hr} ist damit nur abhängig vom Konuswinkel φ und ergibt sich zu:

$$F_{hr} = \frac{F_k}{\tan \varphi} \quad (6.1)$$

Das Modell ermöglicht also einen schnellen Überblick, es stellt sich aber die Frage inwieweit die vorgenommenen Vereinfachungen noch eine sinnvolle Aussage über die tatsächlichen Verhältnisse ermöglichen.

6.1.2 Experimentelle Überprüfung

Um das Modell zu überprüfen soll im Folgenden ein mithilfe der externen Kraftmessplattform unterhalb der Werkstückaufnahme aufgenommener Momentenverlauf mit einem mittels Formel (6.1) und Formel (5.12) berechneten Verlauf verglichen werden. Grundlage für den Vergleich ist ein Experiment, das weggeführt mit Standardparametern für gehärtete Werkstücke durchgeführt wurde.

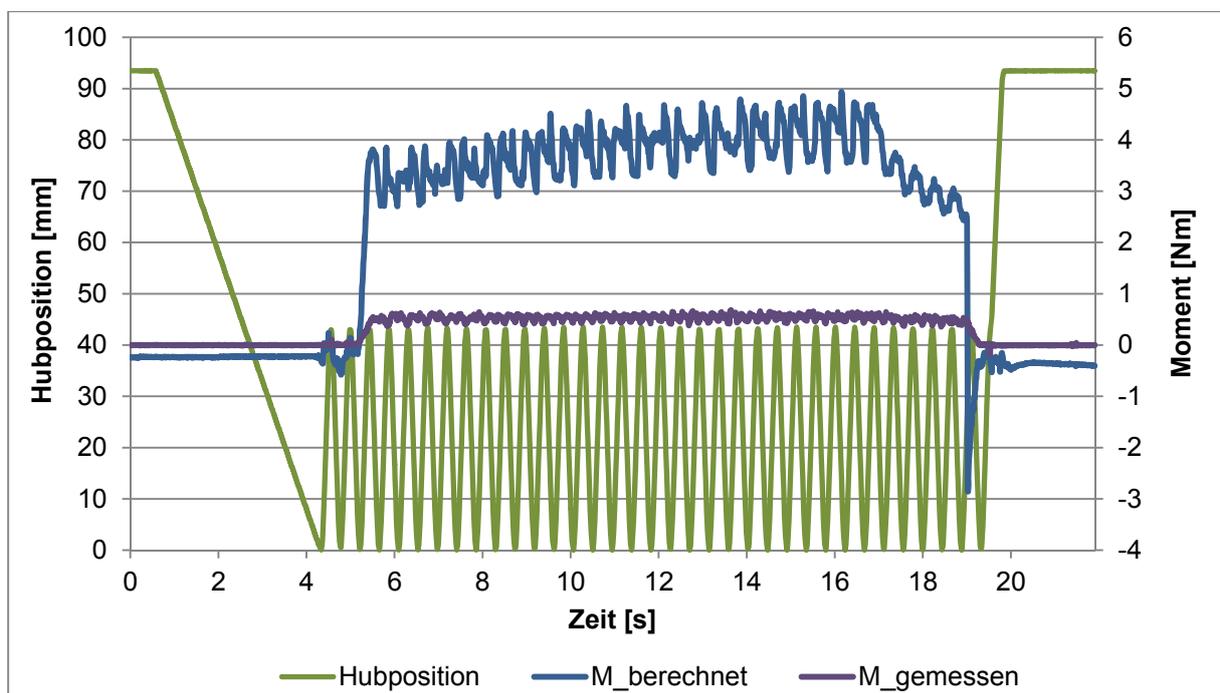


Abbildung 6.2: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Moment – Basismodell.

Abbildung 6.2 stellt den Vergleich von gemessenem und berechnetem Moment dar. Die Berechnung erfolgte mithilfe von Formel (5.12) unter Verwendung der radialen Kraft auf die Honleiste gemäß Formel (6.1). Außerdem ist die Hubposition wiederge-

geben, um einen Überblick über den Honprozess zu bekommen. Während das gemessene Moment Werte zwischen 0Nm und 1Nm annimmt, liegt das berechnete Moment im Bereich zwischen 3Nm und 5Nm. Die berechneten Werte liegen deutlich über den gemessenen. Offensichtlich ist das geometriebasierte Modell also nicht in der Lage die tatsächlichen Verhältnisse ausreichend genau wiederzugeben.

6.1.3 Einfluss der Modellparameter

Entsprechend Formel (6.1) ist die radiale Kraft der Honleiste auf die Bohrungswand nur von der Konuskraft und dem Konuswinkel abhängig. Variiert man nun zunächst den Konuswinkel zwischen $0,5^\circ$ und 10° bei konstanter Konuskraft, so ergibt sich der Verlauf der Normalkraft auf das Werkstück wie in Abbildung 6.3 links dargestellt. Bei den in Versuchen verwendeten Werkzeugen mit Konuswinkeln von $2,5^\circ$ und 6° ergeben sich also theoretische Normalkräfte von 2300N und 950N. Dieser enorme theoretische Unterschied konnte in Versuchen nicht bestätigt werden [BäSc10].

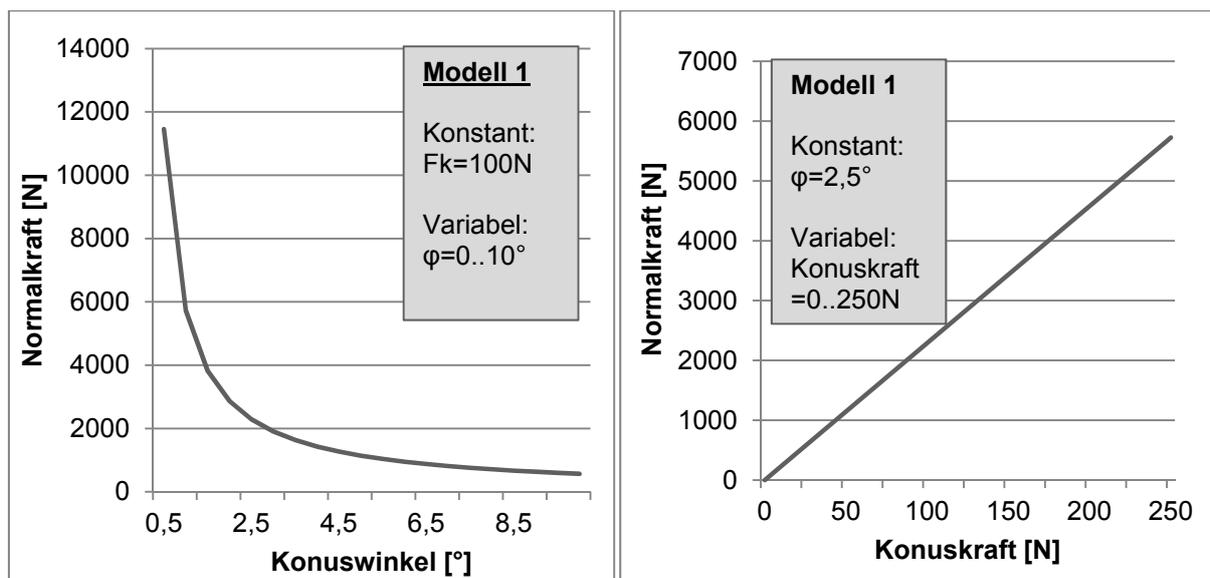


Abbildung 6.3: Normalkraft in Abhängigkeit des Konuswinkels (links) und der Konuskraft (rechts).

Abbildung 6.3 gibt rechts außerdem die Normalkraft bei einem konstanten Konuswinkel von $2,5^\circ$ für verschiedene Konuskraften zwischen 0N und 250N wieder. Diese Belastungen entsprechen denen, die während der Versuchsreihen gemessen werden können. Liegen die Werte noch höher, kommt man in den Bereich des leistungssteigerten Hochgeschwindigkeitshonens. Auch hier bringt die Berechnung enorme Unterschiede. So liegt die sich ergebende Normalkraft für eine Konuskraft von 100N

bei 2300N, bei einer Konuskraft von 200N dagegen schon bei 4600N. Bei einer Leistenfläche von 60mm^2 würden sich bei vollflächigem Kontakt also Schneiddrücke von etwa 38N/mm^2 beziehungsweise 77N/mm^2 ergeben. Auch diese theoretischen Werte scheinen sehr hoch zu sein. Offensichtlich hat das Basismodell durch seine vielen vorgenommenen Vereinfachungen wenig Potential zu einer sinnvollen Berechnung des Honprozesses.

6.2 Modell mit Berücksichtigung von Reibkräften

6.2.1 Herleitung des Modells

Abbildung 6.4 zeigt die Kräfte am Honwerkzeug unter Belastung wie von Zettel und Mushardt beschrieben [Zett74], [Mush86]. Nimmt man die Übertragung in der Maschine an den Schnittstellen vom Kraftsensor bis zur Zustellstange als ideal an und vernachlässigt man Verformungen und Trägheiten, so entspricht die gemessene Konuskraft F_k der Kraft auf die Zustellstange. Gewichtskräfte und weitere Reibanteile werden vernachlässigt. Das System wird weiterhin als ideal steif angenommen.

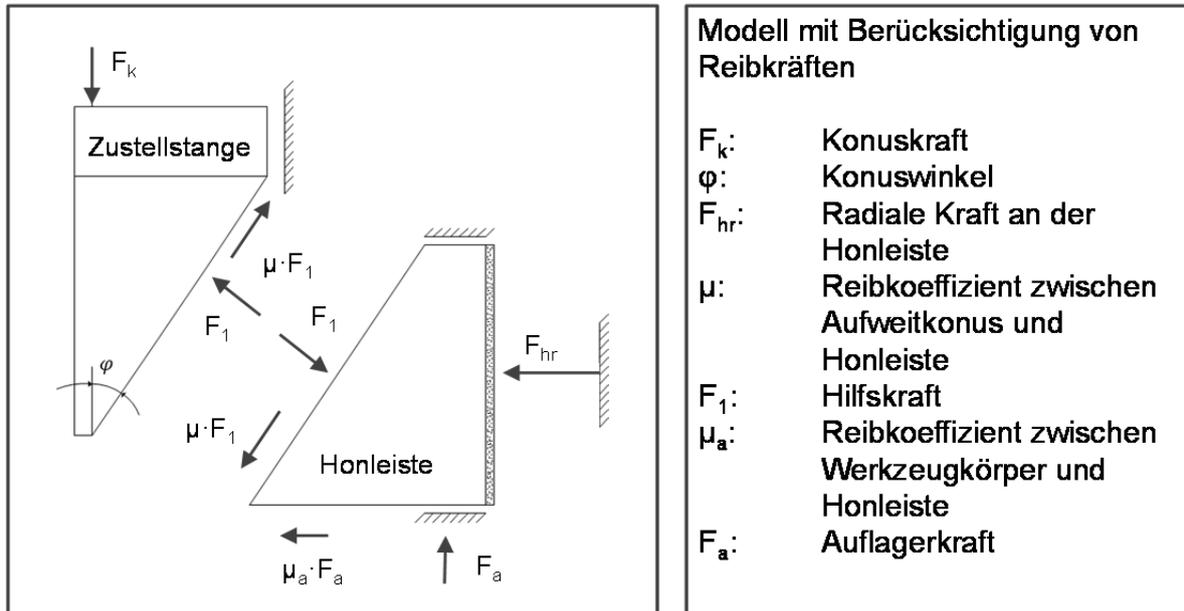


Abbildung 6.4: Kräfte am Honwerkzeug nach [Mush86].

Mit dem Reibkoeffizient μ zwischen Zustellstange und Honleiste, dem Reibkoeffizient μ_a zwischen Honleiste und Werkzeugkörper und dem Konuswinkel φ lässt sich die radiale Kraft auf die Honleiste F_{hr} über das Kräftegleichgewicht an Honleiste und Zustellstange berechnen:

Honleiste:

$$\begin{aligned} \rightarrow: \quad & -F_{hr} - \mu_a \cdot F_a - \mu \cdot F_1 \cdot \sin \varphi + F_1 \cdot \cos \varphi = 0 \\ & \Leftrightarrow F_{hr} = F_1 \cdot (\cos \varphi - \mu \cdot \sin \varphi) - \mu_a \cdot F_a \end{aligned} \quad (6.2)$$

$$\begin{aligned} \uparrow: \quad & F_a - F_1 \cdot \sin \varphi - \mu \cdot F_1 \cdot \cos \varphi = 0 \\ & \Leftrightarrow F_a = F_1 \cdot (\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Zustellstange:

$$\begin{aligned} \uparrow: \quad & -F_K + \mu \cdot F_1 \cdot \cos \varphi + F_1 \cdot \sin \varphi = 0 \\ & \Leftrightarrow F_K = F_1 \cdot (\mu \cdot \cos \varphi + \sin \varphi) \\ & \Leftrightarrow F_1 = \frac{F_K}{\sin(\varphi) + \mu \cdot \cos(\varphi)} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Setzt man nun (6.3) in (6.2) ein, so ergibt sich:

$$F_{hr} = F_1 \cdot ((\cos \varphi - \mu \cdot \sin \varphi) - \mu_a \cdot (\mu \cdot \cos \varphi + \sin \varphi)) \quad (6.5)$$

Unter der Annahme, dass die Reibwerte μ_a und μ beide die Reibung von Stahl auf Stahl beschreiben, kann vereinfachend geschrieben werden:

$$F_{hr} = F_1 \cdot ((1 - \mu^2) \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \mu \cdot \sin \varphi) \quad (6.6)$$

Setzt man (6.4) in (6.6) ein, so ergibt sich:

$$F_{hr} = \frac{F_k \cdot (\cos \varphi \cdot (1 - \mu^2) - 2 \cdot \mu \cdot \sin \varphi)}{\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi} \quad (6.7)$$

Da der Term mit μ^2 vernachlässigbar klein wird, kann er zur Vereinfachung entfallen. Damit ergibt sich F_{hr} in Abhängigkeit von Konuskraft F_k , Konuswinkel φ und Reibwert μ zu:

$$F_{hr} = \frac{F_k \cdot (\cos \varphi - 2 \cdot \mu \cdot \sin \varphi)}{\sin \varphi + \mu \cdot \cos \varphi} \quad (6.8)$$

Eine Überprüfung der Vereinfachung geht von der Annahme aus, dass μ und μ_a den gleichen Wert annehmen. Abbildung 6.5 zeigt den Verlauf der Normalkraft über den Reibkoeffizienten einmal unter Vernachlässigung des quadratischen Terms und einmal unter Berücksichtigung des quadratischen Terms.

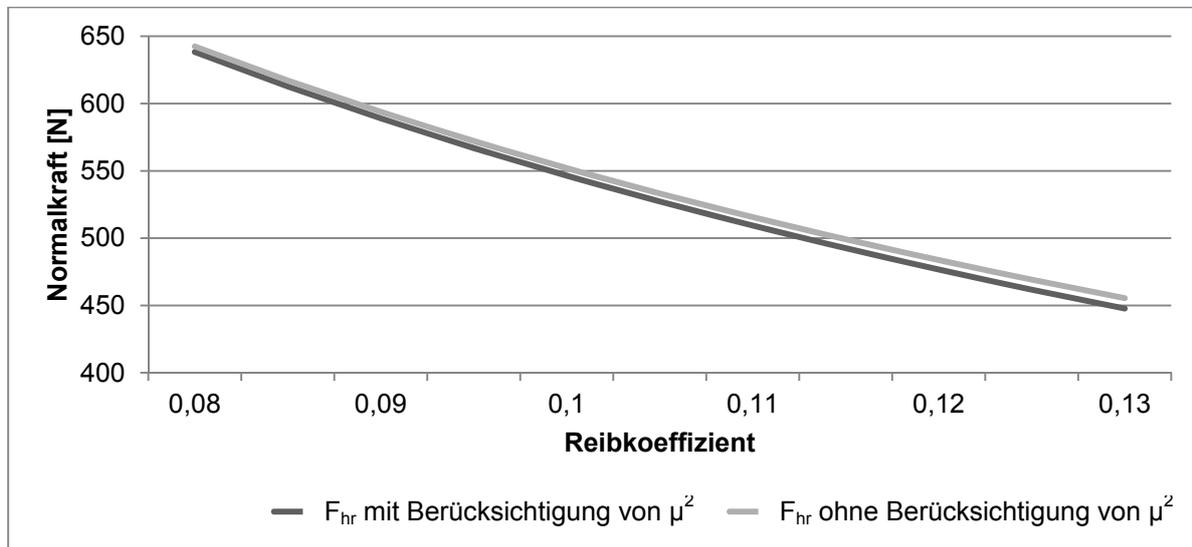


Abbildung 6.5: Normalkraft über den Reibkoeffizienten.

Aus Abbildung 6.5 ist zu erkennen, dass die Abweichungen zwischen beiden Verläufen minimal sind. Für einen Wert von 0,1 für den Reibkoeffizienten ergibt sich eine Abweichung der Normalkraft von knapp 6N. Dies entspricht einer Abweichung von 1%. Im Folgenden soll der quadratische Term trotz der nur geringen Abweichung berücksichtigt werden. Die weiteren Ausführungen beziehen sich also auf Formel (6.7). Die radiale Kraft an der Honleiste ist in diesem Fall also nicht mehr nur von Konuskraft und Konuswinkel abhängig, sondern berücksichtigt auch die Reibverhältnisse im Werkzeug.

6.2.2 Experimentelle Validierung des Modells

Zur Validierung wird ein experimentell ermittelter mit einem gemäß dem oben erläuterten Modell berechneter Verlauf verglichen. Abbildung 6.6 zeigt den gemessenen und berechneten Momentenverlauf unter Verwendung des Modells mit Berücksichtigung der Reibverhältnisse im Werkzeug. Der Honversuch wird unter Verwendung der Standardparameter (vgl. Tabelle 4.1) durchgeführt mit gehärteten Werkstücken durchgeführt. Der Tangentialkraftkoeffizient an der Honleiste $\mu_h=0,192$ wird gemäß den oben beschriebenen Versuchen ermittelt, die Koeffizienten für die Führungsleis-

ten ergeben sich zu $\mu_{s1} = \mu_{s2} = \mu_s = 0,101$. Als typischer Wert für eine Reibung von Stahl auf Stahl bei leichter Schmierung wird $\mu = \mu_a = 0,11$ angenommen [Kuch07]. Als Ergebnis der Berechnung mit dem erweiterten Modell ist zu erkennen, dass das auf Basis von F_k berechnete Moment deutlich näher an dem gemessenen Verlauf liegt. Das gemessene Moment liegt etwa zwischen 0,4Nm und 0,6Nm. Das berechnete Moment liegt in derselben Größenordnung, es liegt zwischen 0,5Nm und 1Nm. Auch wenn noch deutliche Unterschiede zu erkennen sind, sind diese nicht mehr so groß wie im vorangegangenen Abschnitt.

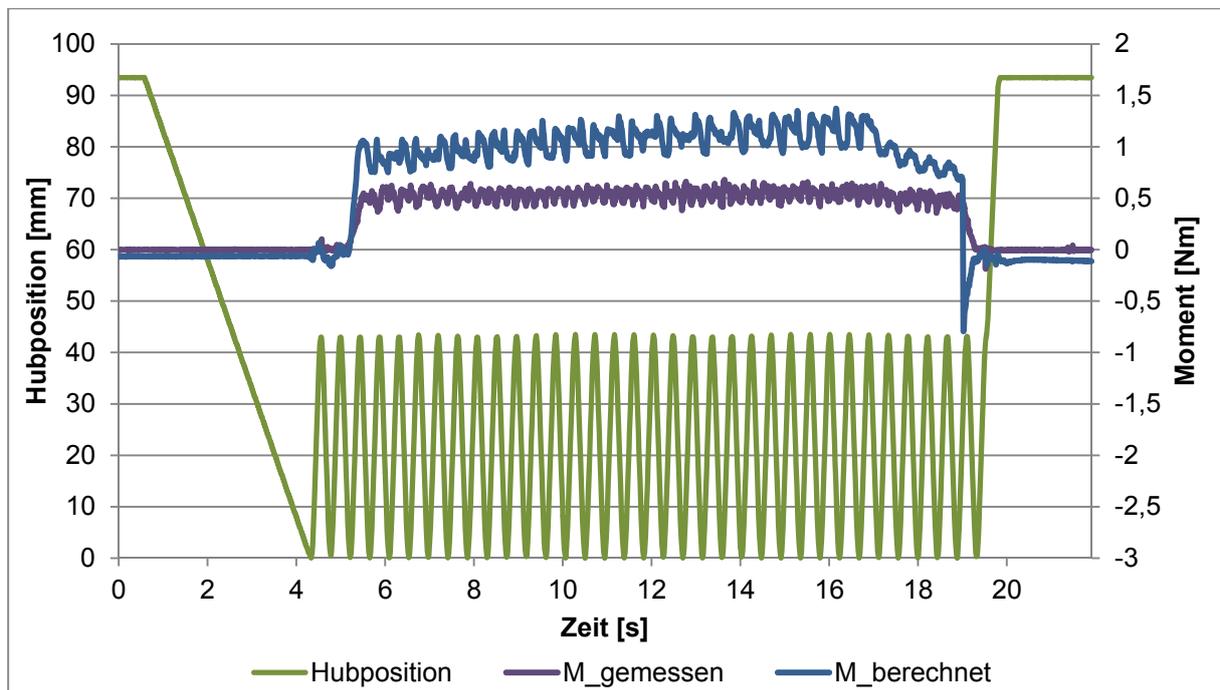


Abbildung 6.6: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Modell - Berücksichtigung der Reibkräfte.

Verfeinert man das Modell nun noch etwas weiter, indem man eine weitere Reibkraftkomponente an der Auflagestelle zwischen Zustellstange und Werkzeugkörper annimmt und außerdem Gewichtskräfte von Honleiste und Zustelleinheit berücksichtigt, so wird Formel (6.7) erweitert zu:

$$F_{hr} = \frac{F_k \cdot (\cos \varphi \cdot (1 - \mu^2) - 2 \cdot \mu \cdot \sin \varphi) - m_h \cdot g \cdot ((\mu^3 - \mu) \cdot \sin \varphi - 2 \cdot \mu^2 \cdot \cos \varphi) - m_k \cdot g \cdot ((\mu^2 - 1) \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \mu \cdot \sin \varphi)}{(1 - \mu^2) \cdot \sin \varphi + 2 \cdot \mu \cdot \cos \varphi} \quad (6.9)$$

Verwendet man nun die erweiterte Formel gemäß (6.9), so erhält man den in Abbildung 6.7 dargestellten Momentenverlauf. Man erkennt nun, dass beide Verläufe in derselben Größenordnung zwischen etwa 0,5Nm und 1Nm liegen. Beide steigen außerdem zu Beginn leicht an und gehen am Ende des Prozesses während der Ausfeuerzeit von 2s deutlich zurück. Das Einführen einer weiteren Reibkomponente sowie der Gewichtskräfte hat also erheblich zur Verbesserung der Genauigkeit des Modells beigetragen.

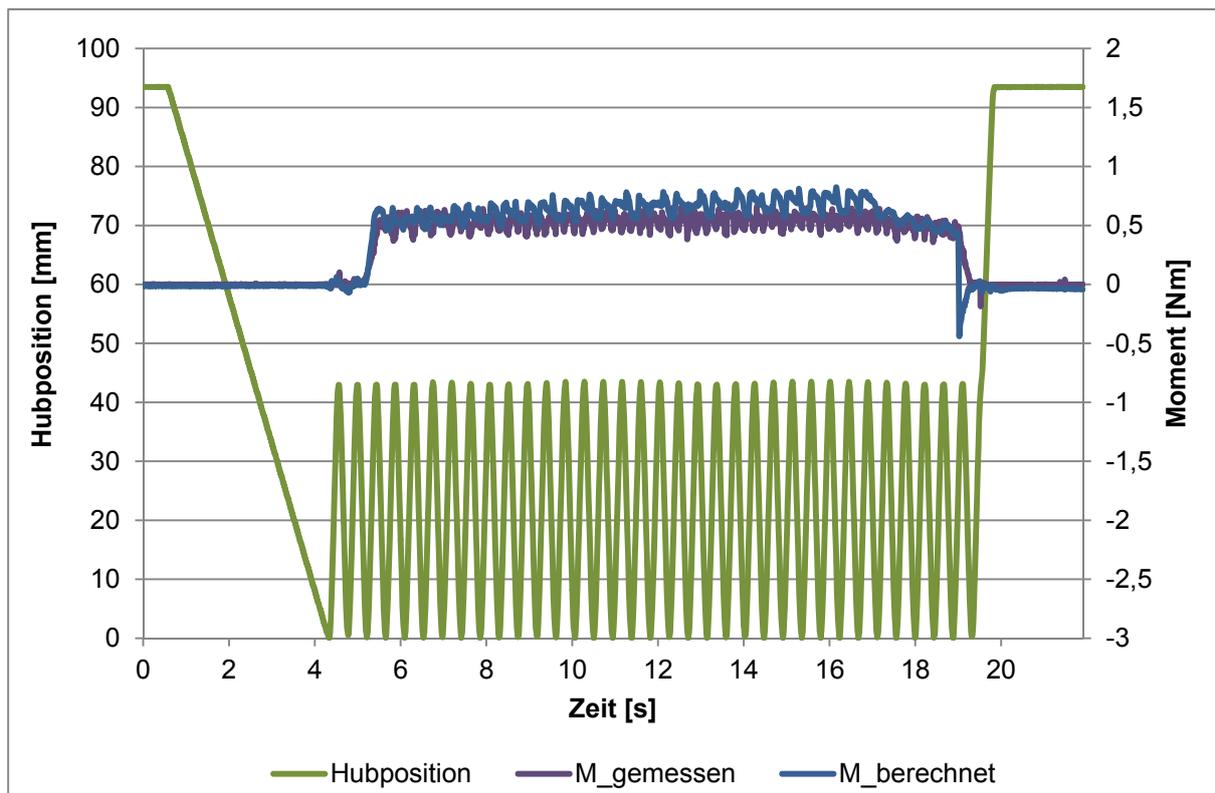


Abbildung 6.7: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Modell - Berücksichtigung der Reibkräfte erweitert.

Während die Betrachtung des vollständigen Prozesses zeigt, dass die hier betrachtete Modellvariante unter Berücksichtigung von Reib- und Gewichtskräften die realen Kraftverhältnisse an der Honleiste offensichtlich deutlich besser wiedergeben kann, sind bei der genaueren Betrachtung auch hier noch einige Abweichungen festzustellen. Abbildung 6.8 zeigt gemessenen und berechneten Momentenverlauf über eine Hubbewegung betrachtet. Dabei ist zu erkennen dass das auf Basis von F_k berechnete Moment Abweichungen von bis zu 25% vom gemessenen Moment zeigt. Die Abweichungen sind im Bereich der Umkehrpunkte besonders groß, während der

Phasen der kontinuierlichen Bewegung sind die Abweichungen kleiner. Dies kann durch den Einfluss der bewegten Massen und ihrer Trägheiten erklärt werden.

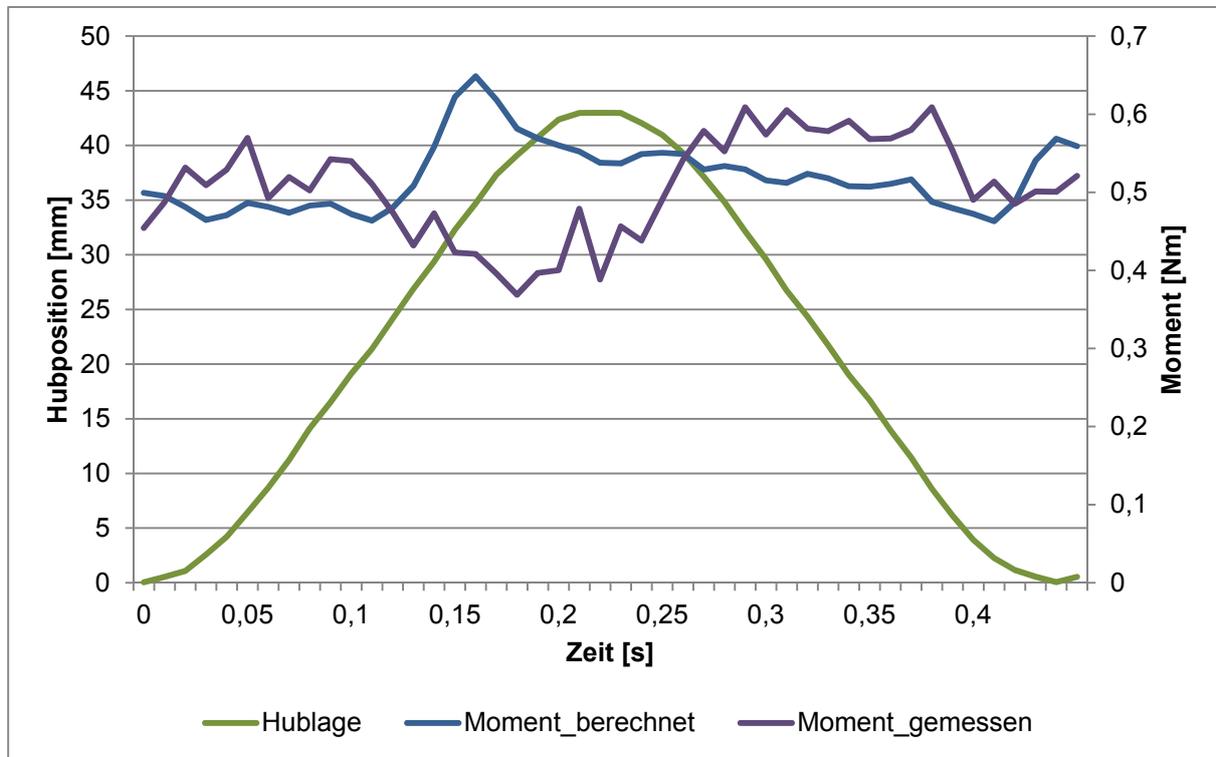


Abbildung 6.8: Vergleich von gemessenem und berechnetem Momentenverlauf während des Honvorgangs, die Graphik zeigt eine Oszillation.

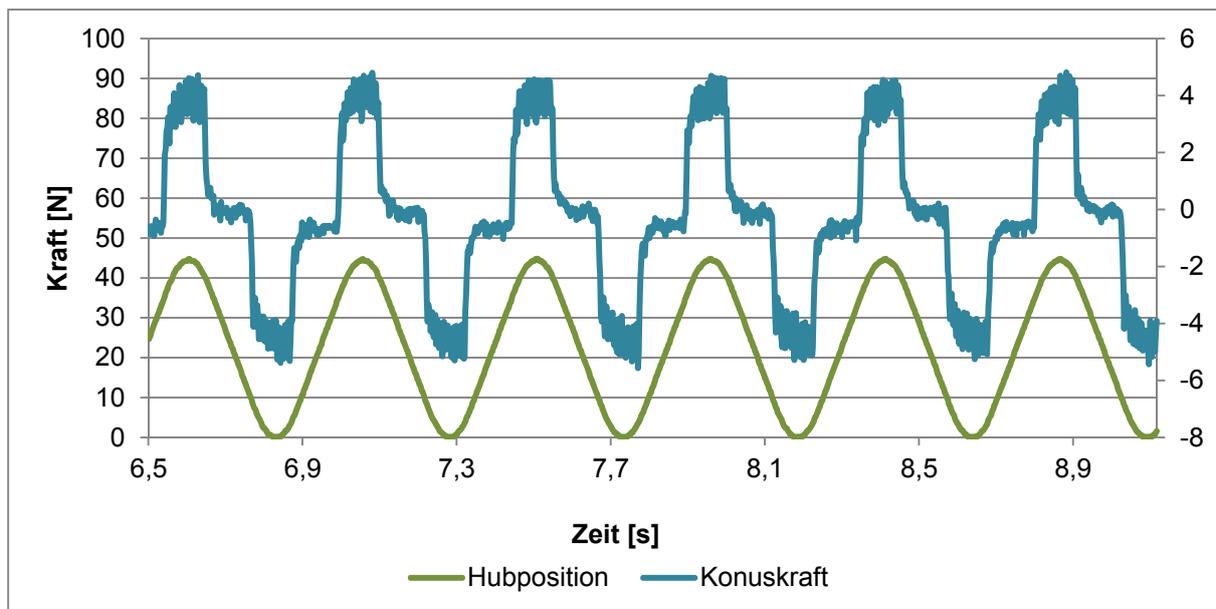


Abbildung 6.9: Konuskraft und Hubposition während einer Honoperation ohne Last.

Abbildung 6.9 zeigt die gemessene Konuskraft während einer Honoperation ohne Last. Obwohl wegen des Fehlens des Werkstücks die Kraft theoretisch bei 0N liegen müsste, sind deutlich Ausschläge zu erkennen. Während der Phase konstanter Geschwindigkeit in der Hubbewegung liegt die gemessene Konuskraft tatsächlich bei 0N, während der Umkehrphasen des Hubs aber nicht. Dieses Phänomen ist mit den Trägheiten der Komponenten im Werkzeug zu erklären. So wird der Werkzeugkörper am oberen Umsteuerpunkt abgebremst, die Relativbewegung von Honleiste und Zustellstange geht aber weiter nach oben und bewirkt eine steigende Kraft auf den Sensor. Erst wenn das gesamte Werkzeug die Umsteuerphase überwunden hat und sich nun nach unten bewegt, wird die gemessene Kraft wieder zu 0N. Diese Trägheitseffekte werden im vorliegenden Modell nicht berücksichtigt, darüber lassen sich die auftretenden Abweichungen erklären.

6.2.3 Einfluss der Modellparameter

Die Normalkraft auf die Honleiste ist nach Formel (6.7) abhängig von Konuswinkel, Konuskraft und Reibkoeffizient. Die Einflüsse dieser Parameter auf den Prozess soll im Folgenden untersucht werden. Dabei wird zunächst der Reibkoeffizient konstant bei 0,11 belassen. Abbildung 6.10 zeigt zunächst die Normalkraft in Abhängigkeit des Konuswinkels.

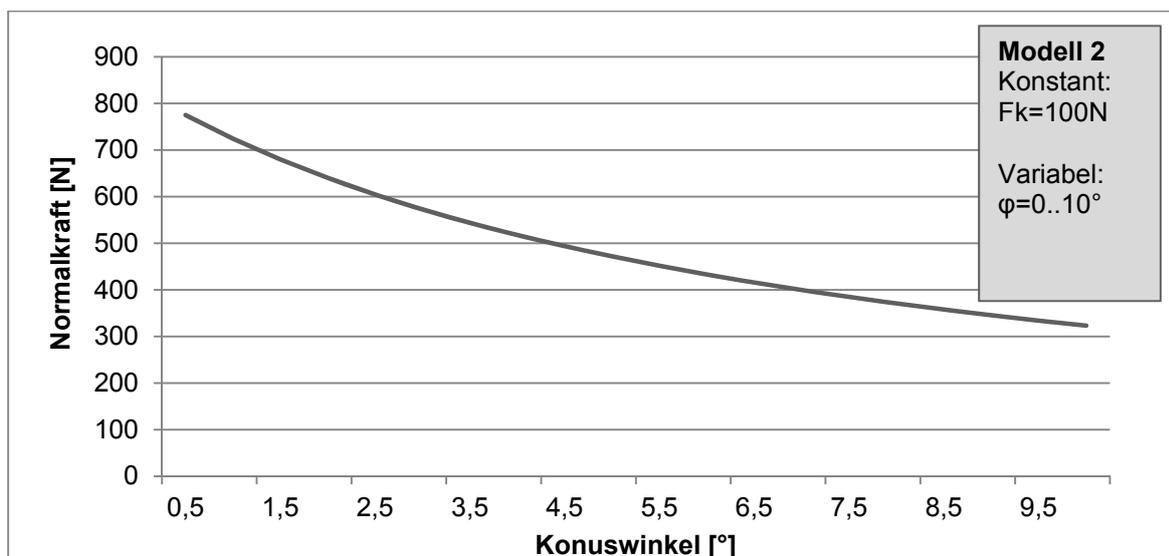


Abbildung 6.10: Normalkraft in Abhängigkeit des Konuswinkels bei konstanter Konuskraft.

Die Normalkraft ergibt sich hier für einen Konuswinkel von 2,5° zu 605N und für einen Konuswinkel von 6° zu 430N. Diese Werte liegen aufgrund der Berücksichtigung

der Reibverhältnisse deutlich unter denen des Basismodells. Die Werte erscheinen wesentlich realistischer, auch unter dem Aspekt vorangegangener Versuchsreihen [BäSc10]. Abbildung 6.11 zeigt die Normalkraft in Abhängigkeit der Konuskraft.

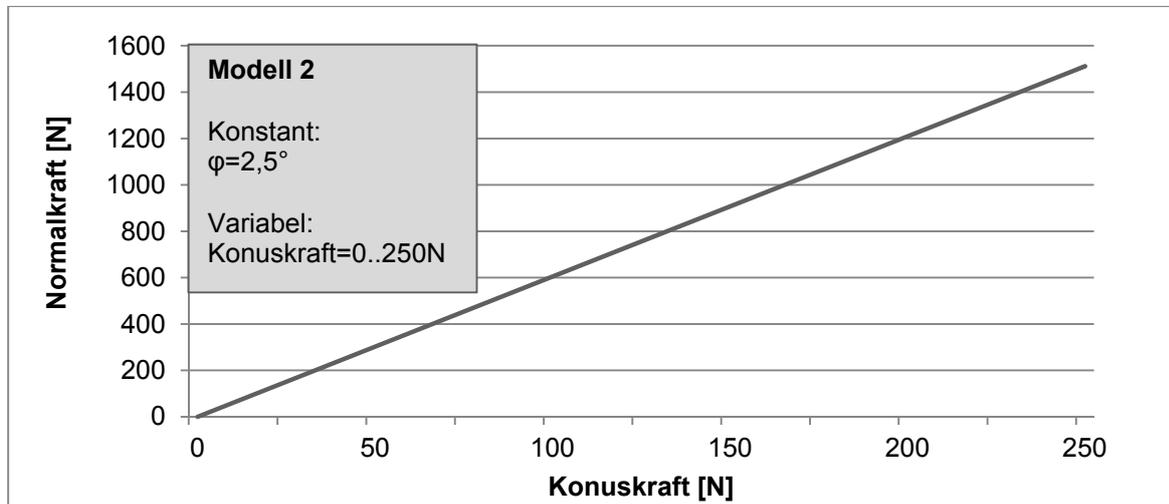


Abbildung 6.11: Normalkraft in Abhängigkeit der Konuskraft bei konstantem Konuswinkel.

Diese wird wieder zwischen 0 und 250N variiert. Der Konuswinkel bleibt konstant bei $2,5^\circ$. Die Normalkraft ergibt sich hier für eine Konuskraft von 100N zu 605N und für eine Konuskraft von 200N zu 1210N. Diese Werte liegen aufgrund der Berücksichtigung der Reibverhältnisse deutlich unter denen des Basismodells.

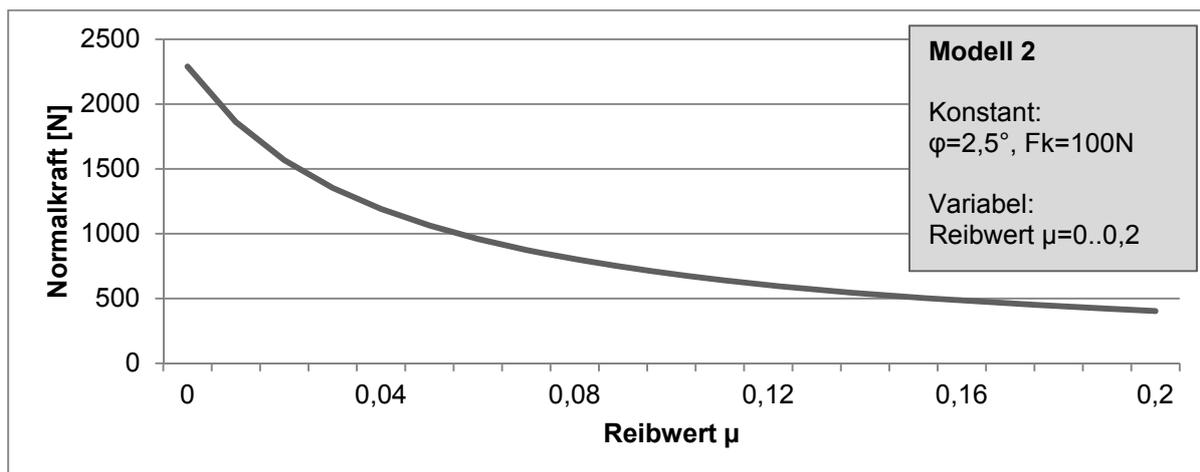


Abbildung 6.12: Normalkraft in Abhängigkeit des Reibwertes.

Abbildung 6.12 zeigt den Einfluss des Reibwertes μ auf die Normalkraft. Die Konuskraft beträgt dabei konstant 100N, der Konuswinkel $2,5^\circ$. Für einen Reibwert $\mu=0$ ergibt sich eine Normalkraft von 2300N, dies entspricht faktisch dem Basismodell. Je

höher der Reibwert liegt, desto geringer wird die sich ergebende Normalkraft. Durch entsprechende Wahl der Komponenten und Beeinflussung des Reibwerts lassen sich die Prozesskräfte also beeinflussen.

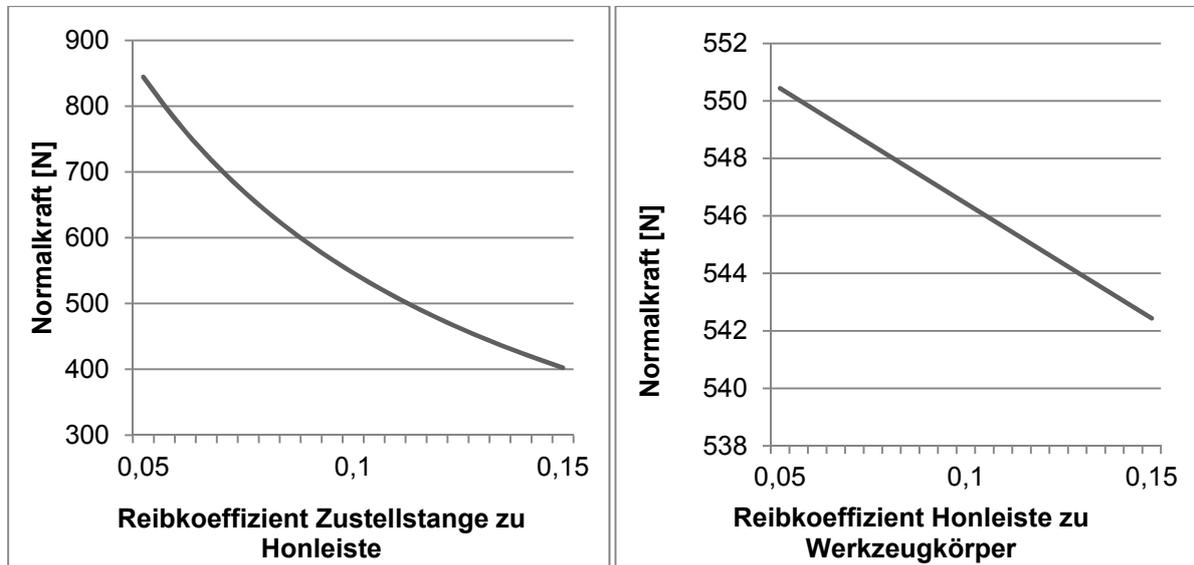


Abbildung 6.13: Einfluss der Reibkoeffizienten auf die Normalkraft.

Die beiden Reibkoeffizienten zwischen Zustellstange und Honleiste μ und zwischen Honleiste und Werkzeugkörper μ_a wurden eingangs als identisch angenommen, da beide die Reibung von Stahl auf Stahl beschreiben. Dennoch ist in Abbildung 6.13 der Einfluss beider Größen einzeln untersucht. Der Einfluss des Reibkoeffizienten zwischen Zustellstange und Honleiste ist sehr groß, eine Variation von μ zwischen 0,05 und 0,15 hat eine Veränderung der Normalkraft von mehr als 400N zur Folge. Variiert man dagegen den Reibkoeffizienten μ_a , so ergibt sich eine Veränderung der Normalkraft von nur 10N.

6.3 Modell unter Berücksichtigung von Massekräften

6.3.1 Phaseneinteilung des Honprozesses

Die Betrachtung des Modells in den vorhergehenden Abschnitten hat gezeigt, dass sich über den Hub Schwankungen im Vergleich der Abweichung von Modell zu gemessenem Wert ergeben. Im Folgenden sollen daher Masseneffekte mit berücksichtigt werden. Dazu wird der Honprozess zunächst in einzelne Phasen unterteilt und dann in den Phasen gesondert betrachtet. Abbildung 6.14 zeigt die Phaseneinteilung des Honprozesses über eine Hubbewegung mit den zugehörigen Zeiten und Wegen.

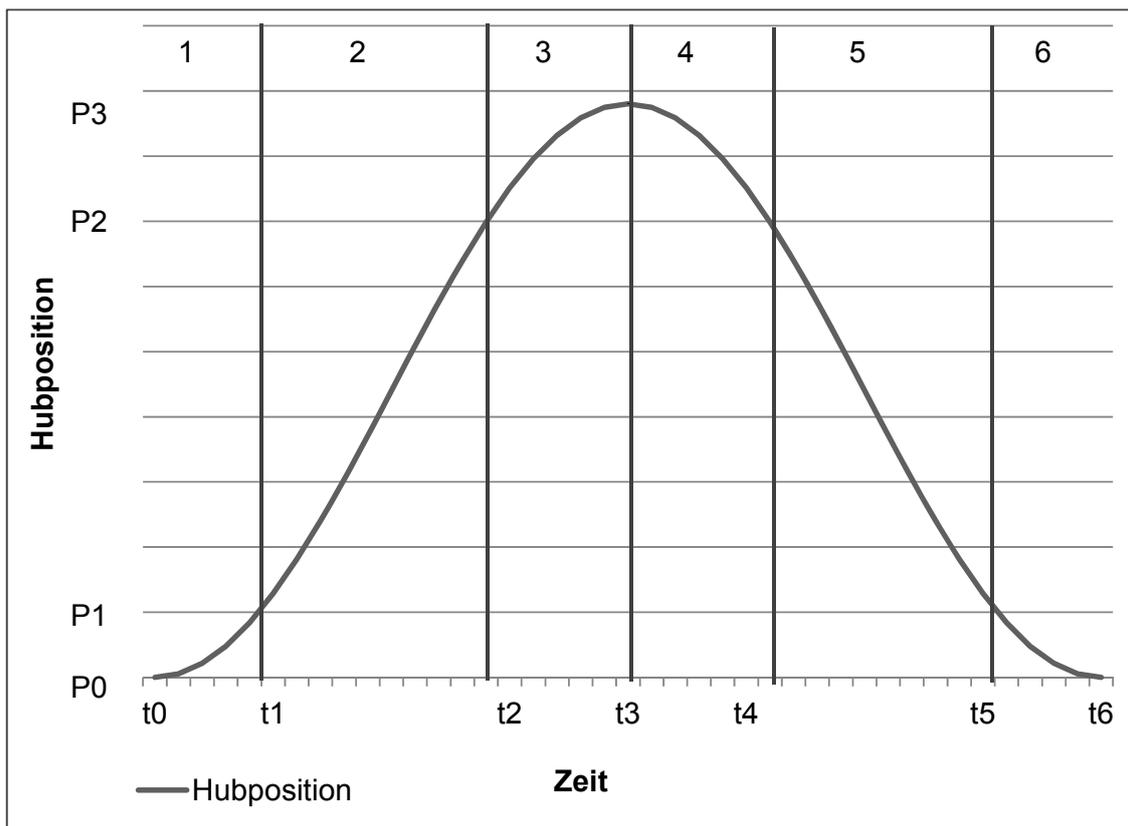


Abbildung 6.14: Die Phasen der Hubbewegung [ScBä14].

Die erste Phase beschreibt den Beginn der Aufwärtsbewegung vom unteren Umsteuerpunkt P0 an. Phase 2 beginnt an der Position P1, die den Übergang zur gleichförmigen Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit während des Aufwärtshubes darstellt. An Position P2 beginnt der Abbremsvorgang bis zum oberen Umkehrpunkt P3, bezeichnet als Phase 3. Phase 4 beschreibt den Beginn der Abwärtsbewegung ab dem oberen Umkehrpunkt, mit einer Beschleunigung des Werkzeugs nach unten. Ab der Position P2 ist die Bewegung in Phase 5 wieder eine gleichförmige, in diesem Fall abwärts gerichtet. Phase 6 beschreibt schlussendlich das Abbremsen aus der Abwärtsbewegung bis zum Erreichen des unteren Umkehrpunktes P0. Im Anschluss beginnt die Hubbewegung wieder von vorne in Phase 1. Da in allen Phasen unterschiedliche Kräfte und Trägheitseffekte herrschen, sollen sie in der folgenden Betrachtung einzeln behandelt werden.

6.3.2 Kräfteverhältnisse an der Honleiste

Abbildung 6.15 zeigt die Kräftebeziehungen am Honwerkzeug während der Aufwärtsbewegung (Phase 2), die eine gleichförmige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit darstellt.

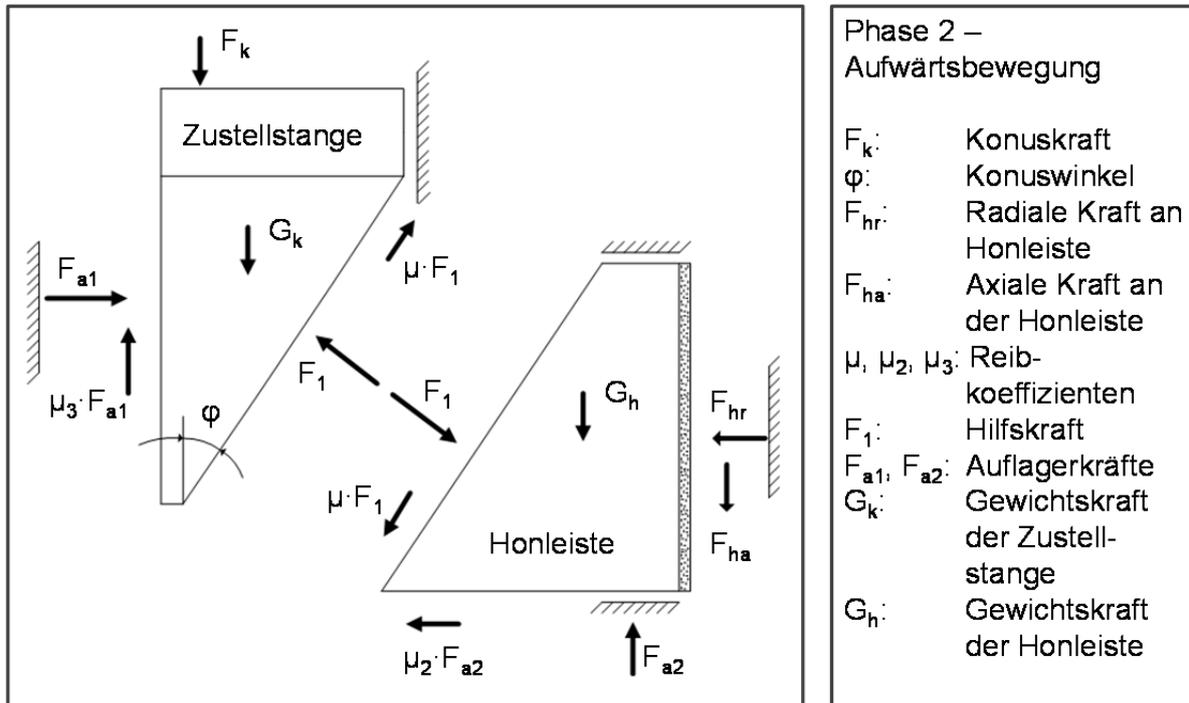


Abbildung 6.15: Kräfte am Honwerkzeug während der Aufwärtsbewegung (Phase 2).

Die Werte für die Reibkoeffizienten μ , μ_2 und μ_3 beziehen sich alle auf Reibeffekte von Stahl auf Stahl und können daher als gleich angenommen werden: μ . G_k und G_h bezeichnen die Gewichtskräfte an Aufweitkegel und Honleiste. F_{ha} ist die axiale Kraft an der Honleiste. Sie kann aus der im Prozess gemessenen Axialkraft abgeleitet werden. Mit dem Kräftegleichgewicht am Zustellkegel (6.10: vertikal, 6.11: horizontal) und an der Honleiste (6.12: vertikal, 6.13: horizontal) ergeben sich die folgenden Formeln:

Zustellstange:

$$-F_k + \mu \cdot F_{a1} + \mu \cdot F_1 \cdot \cos(\varphi) + F_1 \cdot \sin(\varphi) - m_k \cdot g = 0 \quad (6.10)$$

$$F_{a1} - F_1 \cdot \cos(\varphi) + \mu \cdot F_1 \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (6.11)$$

Honleiste:

$$F_{a2} - F_{ha} - \mu \cdot F_1 \cdot \sin(\varphi) - F_1 \cdot \cos(\varphi) - m_1 \cdot g = 0 \quad (6.12)$$

$$-F_{hr} - \mu \cdot F_{a2} - \mu \cdot F_1 \cdot \cos(\varphi) + F_1 \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (6.13)$$

F_{hr} kann damit in Abhängigkeit des Reibwertes μ , der Konuskraft F_k , des Konuswinkels φ , der axialen Kraft an der Honleiste F_{ha} und der Massen m_k und m_h angegeben werden:

$$F_{hr} = -\frac{1}{2\mu \cos(\varphi) - \mu^2 \sin(\varphi) + \sin(\varphi)} * (\mu^2 \sin(\varphi) \cdot (F_k + m_k \cdot g) + 2\mu^2 \cos(\varphi) \cdot F_{ha} - \mu^3 \sin(\varphi) \cdot F_{ha} + \mu \sin(\varphi) \cdot F_{ha} + 2m_1 \cdot g\mu^2 \cos(\varphi) - m_1 \cdot g\mu^3 \sin(\varphi) + m_1 \cdot g\mu \sin(\varphi) + \mu \cos(\varphi) (F_k + m_k \cdot g) + \mu \sin(\varphi) (F_k + m_k \cdot g) - \cos(\varphi) (F_k + m_k \cdot g) \quad (6.14)$$

Genauso können auch die Gleichungen für die gleichförmige Abwärtsbewegung in Phase 5 angegeben werden. Das Kräftegleichgewicht stellt sich sehr ähnlich dar, allerdings ändern durch die Richtungsumkehr hier die axiale Kraft an der Honleiste F_{ha} und die Auflagerkraft zwischen Honleiste und Werkzeug F_{a2} ihre Richtung (vergleiche Abbildung 6.16).

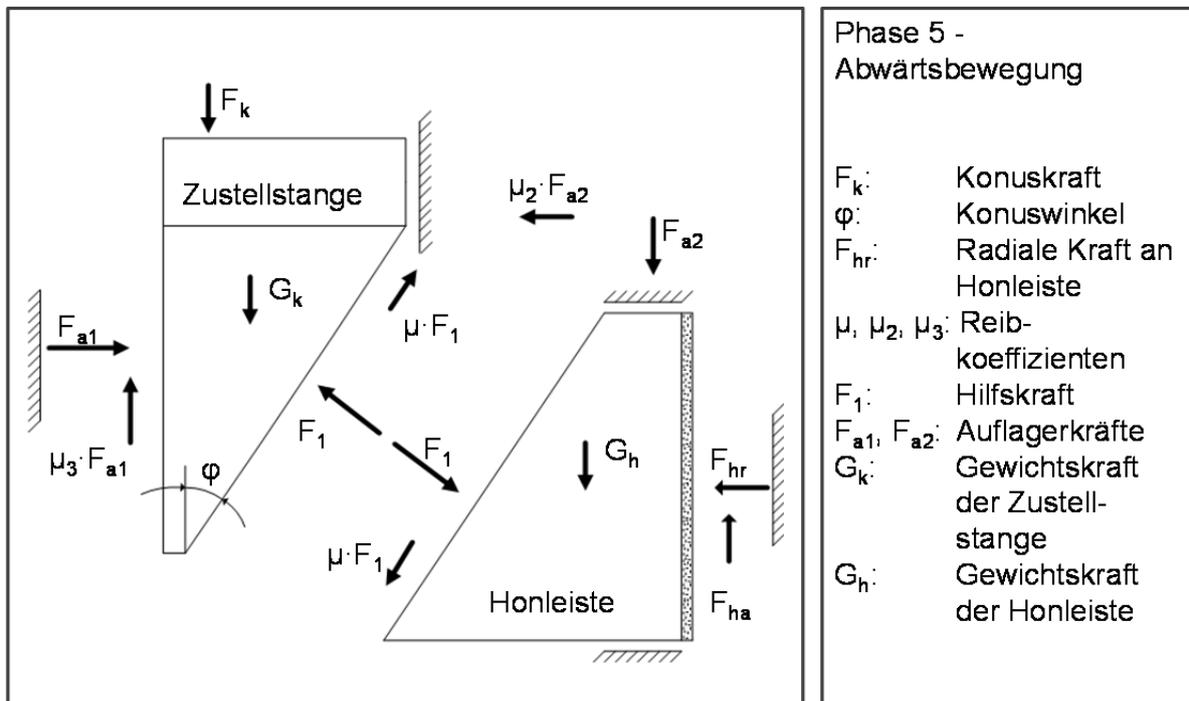


Abbildung 6.16: Kräfte am Honwerkzeug während der Abwärtsbewegung (Phase 5).

Für Phase 3, den Beginn der oberen Umsteuerbewegung zeigt Abbildung 6.17 die vorliegenden Kraftverhältnisse. In dieser Phase wird das Werkzeug abgebremst während es sich dem oberen Umsteuerpunkt nähert. Die Gleichungen für die gleichförmige Aufwärtsbewegung aus Phase 2 müssen nun um die Trägheitsanteile für die Zustelleinheit T_k und für die Honleiste T_h ergänzt werden. Diese Trägheitskräfte sind nach oben gerichtet, da sich Zustelleinheit und Honleiste weiter nach oben bewegen wollen und der verlangsamten Bewegung entgegenstehen. Die Trägheitskräfte können gemäß $T = m \cdot a_H$ bestimmt werden.

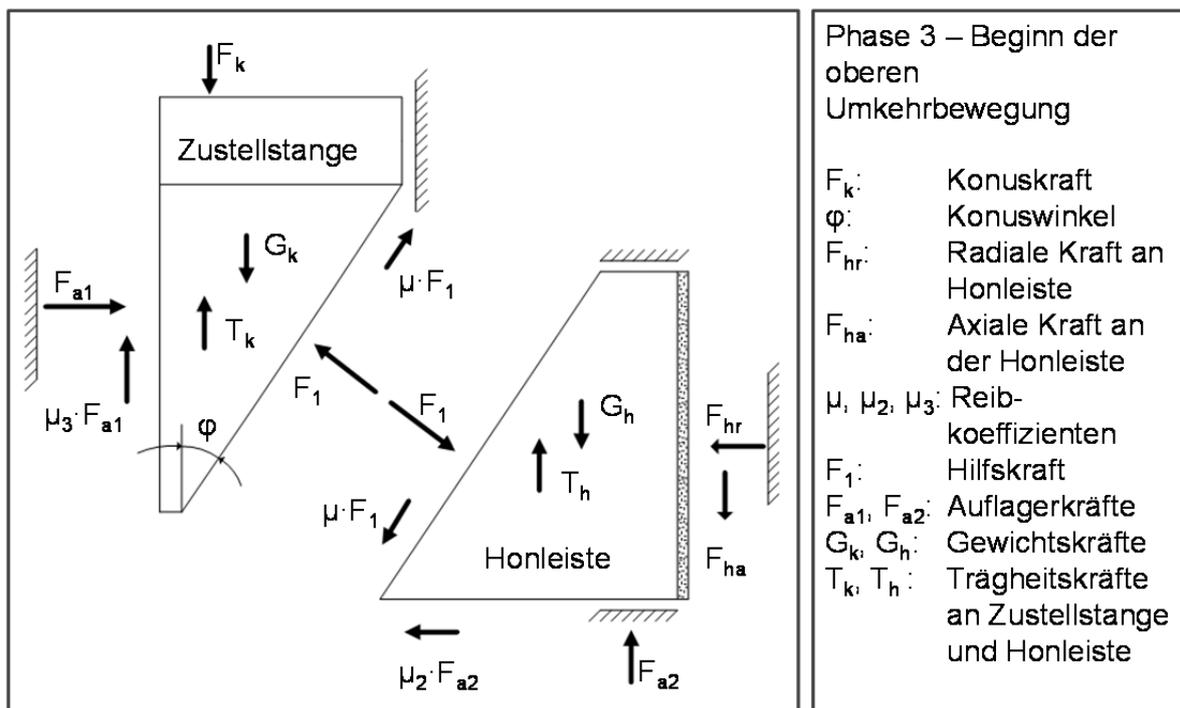


Abbildung 6.17: Kräfteverhältnisse am Werkzeug während des Beginns der oberen Umsteuerphase – Phase 3.

Mit Einführung der Trägheitsanteile T_k und T_h ergibt sich das Kräftegleichgewicht in Phase 3 zu:

Zustellstange:

$$-F_k + \mu \cdot F_{a1} + \mu \cdot F_1 \cdot \cos(\varphi) + F_1 \cdot \sin(\varphi) - m_k \cdot g + T_k = 0 \quad (6.15)$$

$$F_{a1} - F_1 \cdot \cos(\varphi) + \mu \cdot F_1 \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (6.16)$$

Honleiste:

$$F_{a1} - F_{ha} - \mu \cdot F_1 \cdot \sin(\varphi) - F_1 \cdot \cos(\varphi) - m_1 \cdot g + T_h = 0 \quad (6.17)$$

$$-F_{hr} - \mu \cdot F_{a2} - \mu \cdot F_1 \cdot \cos(\varphi) + F_1 \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (6.18)$$

Aus Formel (6.15) bis (6.18) kann wieder die radiale Kraft auf die Honleiste F_{hr} bestimmt werden.

$$F_{hr} = - \frac{1}{2\mu \cos(\varphi) - \mu^2 \sin(\varphi) + \sin(\varphi)} * (\mu^2 \sin(\varphi) \cdot (F_k + m_k \cdot g - m_k \cdot a_H) + 2\mu^2 \cos(\varphi) \cdot (F_{ha} + m_h \cdot g - m_h \cdot a_H) + \mu^3 \sin(\varphi) \cdot (-F_{ha} - m_h \cdot g + m_h \cdot a_H) + \mu \sin(\varphi) \cdot (F_{ha} + m_h \cdot g - m_h \cdot a_H + F_k + m_k \cdot g - m_k \cdot a_H) + \mu \cdot \cos(\varphi) (F_k + m_k \cdot g - m_k \cdot a_H) - \cos(\varphi) (F_k + m_k \cdot g)) \quad (6.19)$$

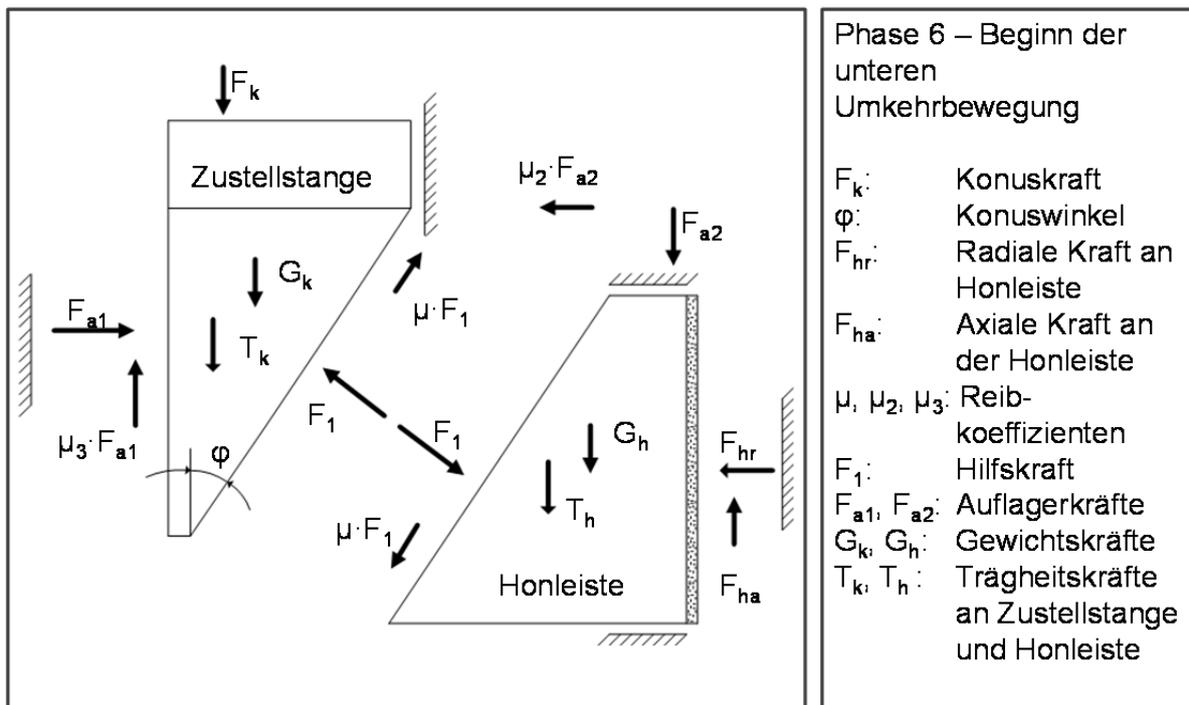


Abbildung 6.18: Kräfteverhältnisse am Werkzeug während des Beginns der unteren Umsteuerphase – Phase 6.

Die gleiche Vorgehensweise kann genutzt werden um auch für die Phasen 1, 4 und 6 die entsprechenden Formeln aufzustellen. Für die Phasen 1 und 4 wird dabei die Aufwärtsbewegung als Basis verwendet, die Gleichungen müssen jeweils um die Trägheitsanteile erweitert werden. Phase 6 liegen die Gleichungen für die gleichförmige Abwärtsbewegung zugrunde, ebenso wie bei Phase 3. In Phase 6 haben die Trägheitskräfte aber umgekehrtes Vorzeichen (vergleiche Abbildung 6.18).

In den verschiedenen Phasen ergeben sich unterschiedliche Formeln zur Berechnung der radialen Kraft auf die Honleiste. Diese ist jeweils abhängig von den bekannten Geometrie- und Systemgrößen. Dies sind die Winkel φ , δ und ε , die Massen m_k und m_h , die Reibkoeffizienten μ , μ_h und μ_s , die Beschleunigung der Hubbewegung,

sowie die gemessenen Größen F_k und F_{ha} . F_k wird direkt als Maschinengröße gemessen, F_{ha} ist aus der an der Kraftmessplattform gemessenen Axialkraft abzuleiten. Die gemessene Axialkraft nimmt auch die Kraftkomponenten an den Führungsleisten mit, durch Dritteln ergibt sich die axiale Kraft an der Honleiste. Die Formeln für die radiale Kraft an der Honleiste können dann in Formel (5.12) zur Berechnung des Moments eingesetzt werden.

6.3.3 Experimentelle Validierung

Dem Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Momentenverlauf liegt wieder ein Experiment mit Standardparametern zugrunde. Die Hublänge beträgt dabei 44mm, eine Hubbewegung benötigt 0,47s. Damit können die Zeitpunkte und Positionen zum Ende der verschiedenen Phasen gemäß Abbildung 6.14 für die vorliegenden Parameter angegeben werden, sie sind in Tabelle 6.1 zusammengestellt:

Tabelle 6.1: Zeitpunkte und Positionen für die einzelnen Phasen der Hubbewegung.

Phase	Beschreibung	Zeitpunkt t	Position P
1	Beginn der Aufwärtsbewegung des Werkzeugs	0,05s	6,8mm
2	Gleichförmige Aufwärtsbewegung	0,17s	37,2mm
3	Beginn der oberen Umsteuerbewegung	0,22s	44mm
4	Beginn der Abwärtsbewegung des Werkzeugs	0,27s	37,2mm
5	gleichförmige Abwärtsbewegung	0,42s	6,8mm
6	Beginn der unteren Umkehrbewegung	0,47s	0mm

Die Masse der Zustelleinheit beträgt 0,5kg, die Masse der Honleiste 0,002kg, die Beschleunigung der Hubbewegung beträgt 5000mm/s^2 . Alle anderen Parameter bestehen analog zu den vorangegangenen Versuchen. Abbildung 6.19 zeigt die Hubposition während einer Hubbewegung von 0,47s inklusive der gemessenen Signale für Konuskraft F_k und Axialkraft F_{ha} . Die gemessenen Signale wurden zur Berechnung des Momentes entsprechend der oben beschriebenen Formeln genutzt. Die Konuskraft liegt bei etwa 100N, zu erkennen ist ein Zustellschritt der Aufweitbewegung.

Diese erfolgen entsprechend der Pausenzeit etwa alle 0,25s, nach einem Zustellschritt steigt die Konuskraft zunächst an, um dann während der Pausenzeit wieder abzusinken. Die Axialkraft verändert sich mit der Oszillationsbewegung und der damit schwankenden wirksamen Leistenlänge. In den Umkehrpunkten wird die Axialkraft zu Null, während des vollflächigen Kontakts zwischen Honleiste und Bohrungswandung im Bereich der gleichförmigen Bewegung ist sie am größten. Während der Abwärtsbewegung nimmt die Axialkraft positive Werte an, während der Aufwärtsbewegung negative. Die Signale werden zunächst in die unterschiedlichen Phasen unterteilt und das Moment dann gesondert für die einzelnen Phasen berechnet.

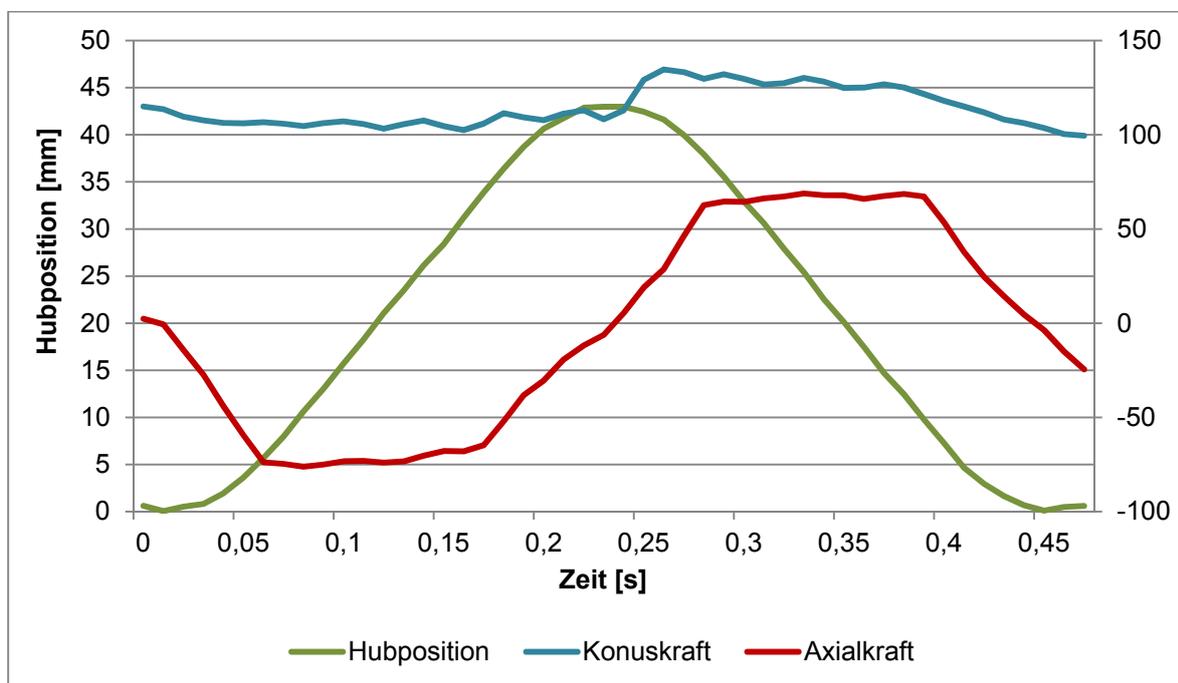


Abbildung 6.19: Konuskraft, Axialkraft und Hubposition aufgenommen über eine Hubbewegung.

Abbildung 6.20 zeigt den Vergleich von gemessenem und berechnetem Moment unter Berücksichtigung von Trägheitsanteilen. Zu erkennen ist dabei eine gute Übereinstimmung in allen Phasen, die verbliebenen Schwankungen sind geringer als 15%. Die größten Abweichungen tauchen dabei in der Aufwärtsbewegung, also den Phasen 1, 2 und 3 auf. Die Abwärtsbewegung kann dagegen sehr genau dargestellt werden. Die noch vorhandenen Abweichungen lassen sich durch verschiedene Punkte erklären. So gibt zum einen die Messung der Axialkraft durch die externe Kraftmessplattform unterhalb des Werkstücks nicht ausschließlich die axiale Kraft-

komponente an der Honleiste sondern auch an den Führungsleisten wider. Die hier vorgenommene einfache Drittelung der Axialkraft bringt einen gewissen Fehler ein.

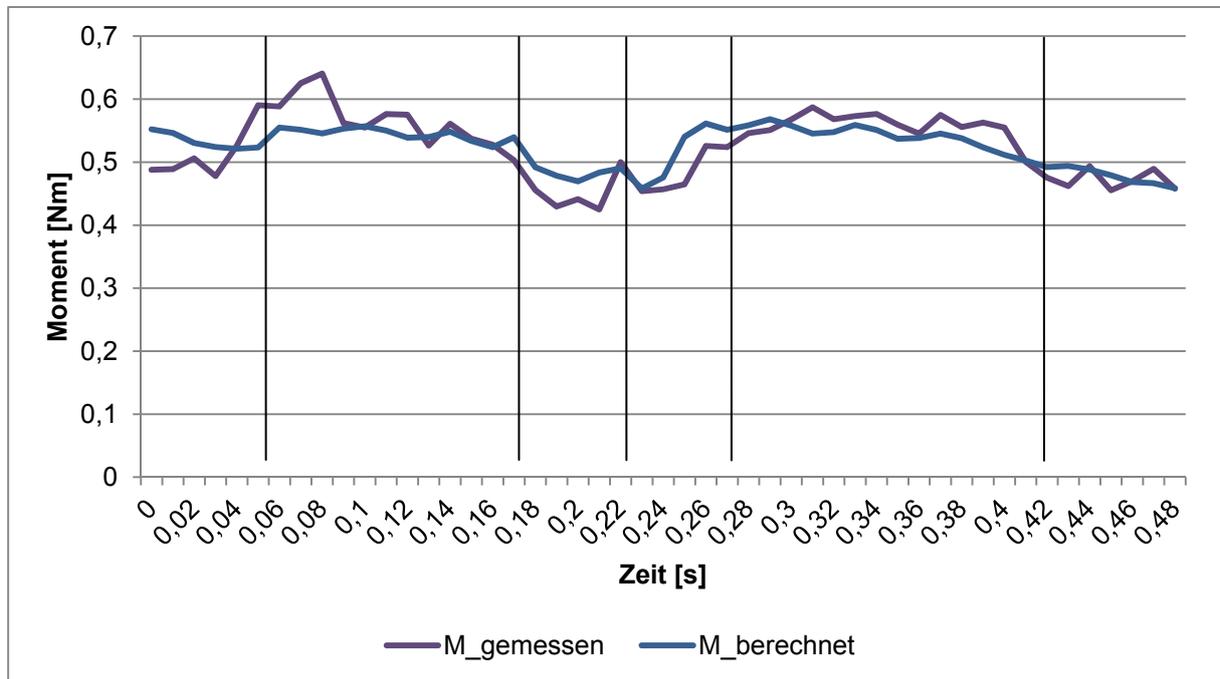


Abbildung 6.20: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Moment über eine Hubbewegung.

Darüber hinaus wurde zur Berechnung des Momentes ein konstanter Bohrungsdurchmesser von 8mm angenommen, in der Realität wird der Bohrungsdurchmesser aber während des Honvorgangs aufgeweitet. Außerdem geht auch dieses Modell von ideal steifen Komponenten aus, Verformungen und elastische Effekte werden nicht berücksichtigt. Das dürfte die größte Quelle für verbliebene Fehler darstellen.

6.3.4 Einfluss der Modellparameter

Die radiale Kraft auf die Zustellstange wird hier von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören nun neben dem Konuswinkel, der Konuskraft und dem Reibkoeffizienten auch die Massen von Zustelleinheit und Honleiste, die Axialkraft an der Honleiste und die Beschleunigung der Hubbewegung. Da in den unterschiedlichen Phasen verschiedene Kräfteverhältnisse herrschen, sollen hier zwei Phasen stellvertretend näher untersucht werden. Dies ist zum einen gleichförmige Phase, da die gleichförmigen Phasen den größten Anteil des Honprozesses beschreiben. Exemplarisch soll daher zunächst die Aufwärtsbewegung in Phase 2 betrachtet werden. Die radiale Kraft auf die Honleiste lässt sich hier gemäß Formel (6.14) beschrei-

ben und ist abhängig von dem Konuswinkel φ , dem Reibkoeffizienten μ , den Massen von Zustellstange und Honleiste m_k und m_h , der axialen Kraft an der Honleiste F_{ha} und der Konuskraft F_k .

Abbildung 6.21 zeigt zunächst die Normalkraft an der Honleiste über den Konuswinkel in Phase 2. Je größer der Konuswinkel wird, desto geringer wird die sich ergebende radiale Kraft auf die Honleiste.

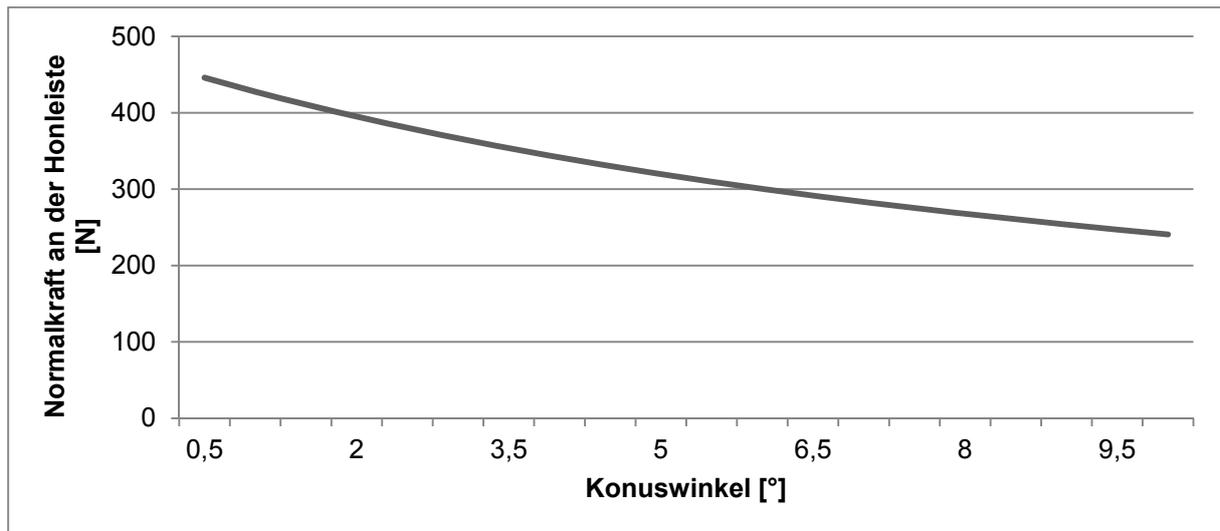


Abbildung 6.21: Normalkraft an der Honleiste in Abhängigkeit des Konuswinkels - Phase 2.

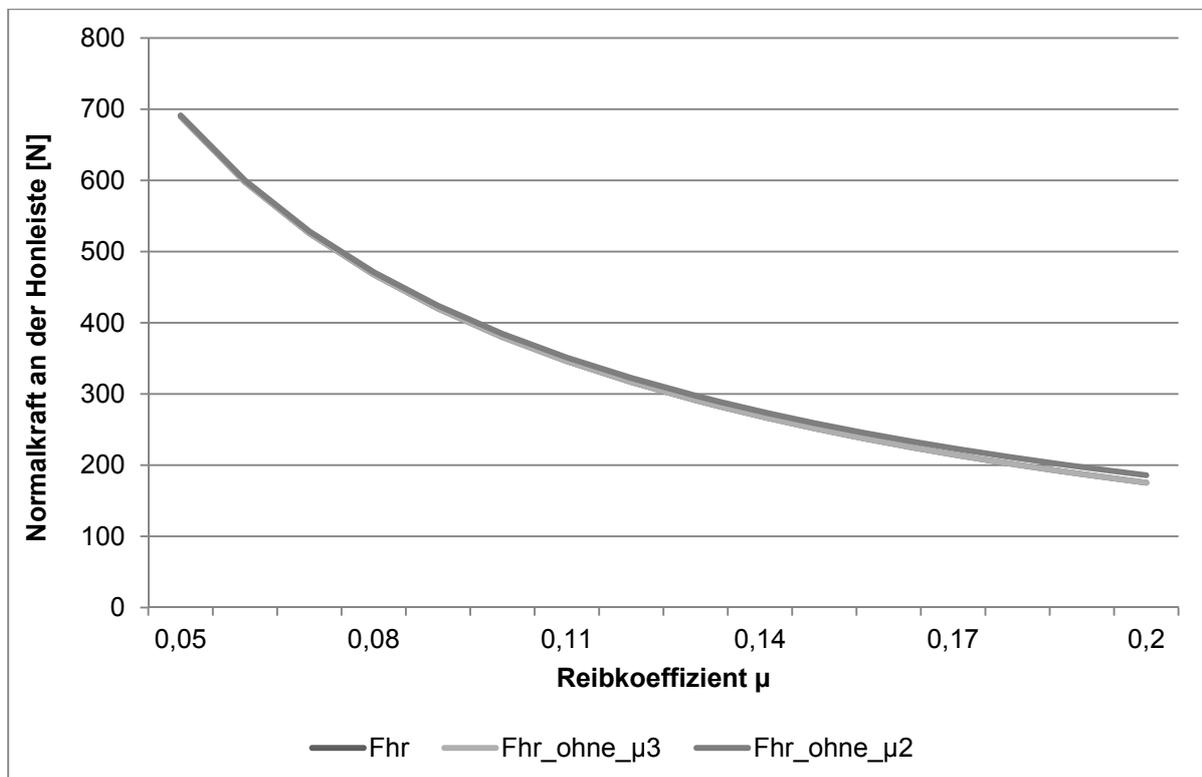


Abbildung 6.22: Normalkraft an der Honleiste in Abhängigkeit des Reibkoeffizienten - Phase 2.

Mit zunehmendem Reibkoeffizienten μ nimmt die Normalkraft an der Honleiste immer stärker ab. Dies lässt sich durch zunehmende Reibverluste erklären. Wie Abbildung 6.22 zeigt, spielen die in Formel (6.14) enthaltenen Terme mit μ^3 zur Berechnung praktisch keine Rolle, sie können zur Vereinfachung entfallen. Auch die Terme mit μ^2 haben keinen signifikanten Einfluss, erst bei sehr großen Werten für μ beginnen sie ins Gewicht zu fallen.

Die Massen von Zustelleinheit und Honleiste haben in diesem Fall der gleichförmigen Bewegung, in dem Trägheitseffekte keine Rolle spielen, praktisch keinen Einfluss auf die Prozesskräfte.

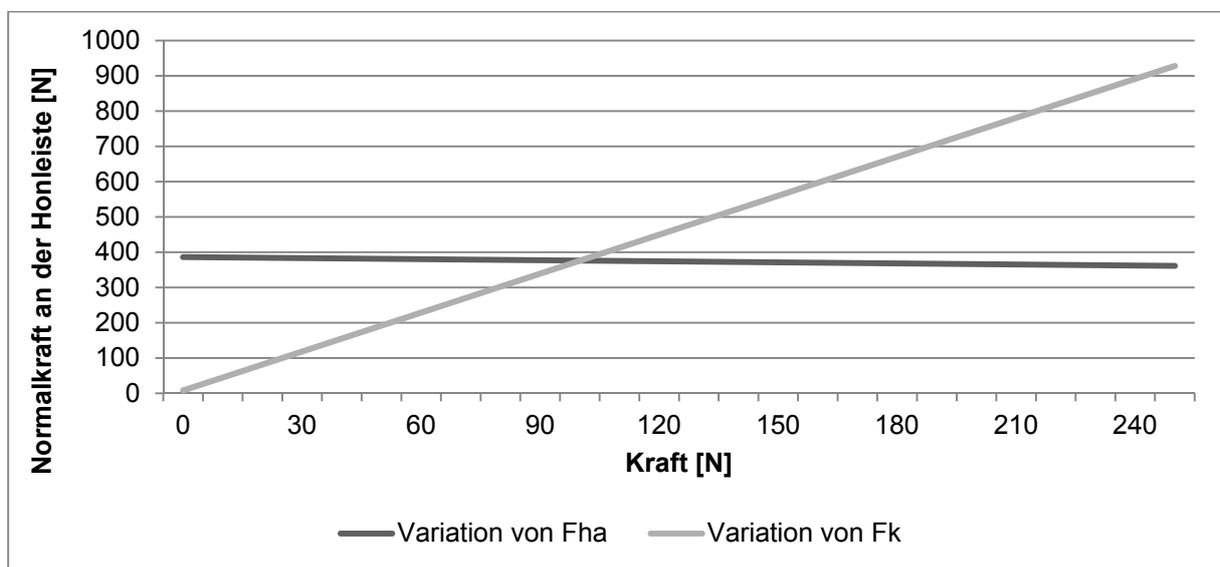


Abbildung 6.23: Normalkraft an der Honleiste in Abhängigkeit von axialer Kraft an der Honleiste und Konuskraft - Phase 2.

Abbildung 6.23 zeigt, dass die axiale Kraft an der Honleiste nur einen geringen Einfluss auf die radiale Kraft an der Honleiste hat. Die Konuskraft beeinflusst sie dagegen entscheidend.

Als Nächstes soll eine Umkehrphase betrachtet werden, die auch durch Trägheitskräfte beeinflusst wird. Gewählt wird Phase 3 mit der entsprechenden Formel für die radiale Kraft auf die Honleiste nach Formel (6.19). Auch hier bewirkt eine Zunahme von μ eine Abnahme der resultierenden Kraft an der Honleiste, gleiches gilt für eine Variation des Konuswinkels. Auch die Variationen von axialer Kraft an der Honleiste F_{ha} und Konuskraft F_k bringen ähnliche Ergebnisse wie in Phase 2. Interessant ist hier aber die Untersuchung der Abhängigkeit von der Beschleunigung der Hubbewe-

gung a_H , da diese in Zusammenhang mit der Masse direkten Einfluss auf die Trägheitskräfte hat. Abbildung 6.24 zeigt den Zusammenhang zwischen der Kraft an der Honleiste und der Beschleunigung der Hubbewegung für verschiedene Massen der Zustelleinheit. Je größer die Beschleunigung wird, desto kürzer werden die Umkehrphasen. Durch das stärkere Abbremsen sinken auch die Kräfte an der Honleiste. Verstärkt wird dieser Effekt bei einem geringeren Gewicht der Zustelleinheit, der Trägheitseffekt ist dann geringer. Die Honleiste mit ihrem sehr geringen Gewichtsanteil im Vergleich zur Zustelleinheit spielt dabei kaum eine Rolle.

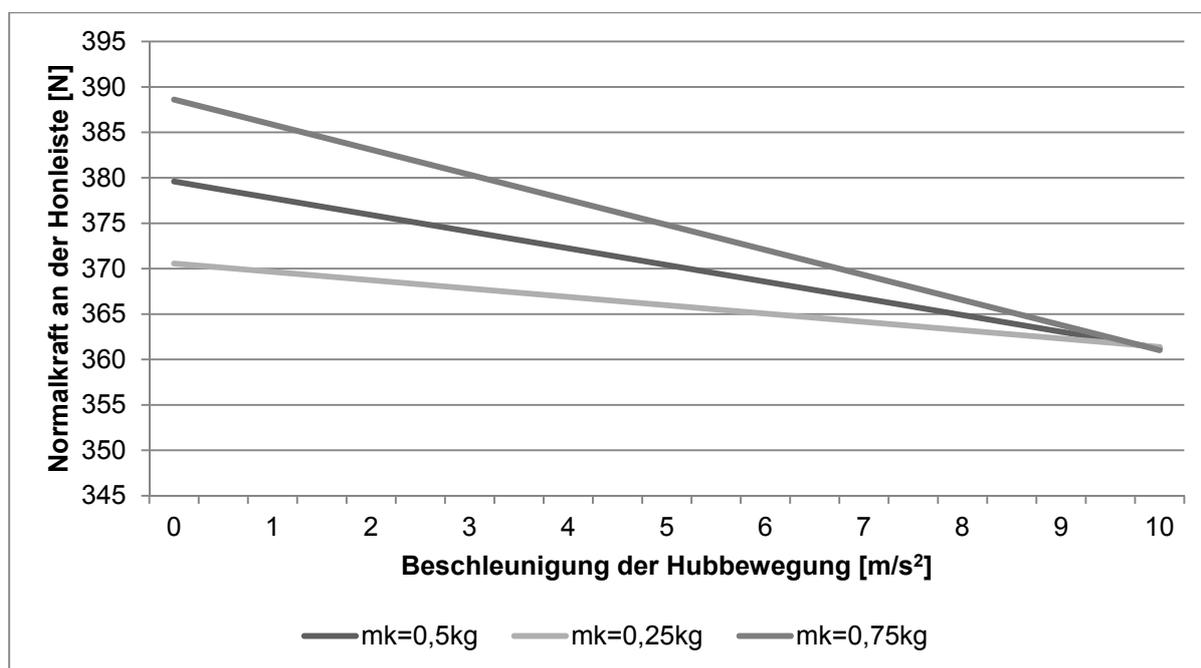


Abbildung 6.24: Normalkraft an der Honleiste über die Hubbeschleunigung a_H für verschiedene Massen m_k - Phase 3.

7 Ansätze zur modellbasierten Prozessoptimierung

Mithilfe der oben dargelegten Modelle können grundlegende Phänomene erklärt und Verbesserungen erarbeitet werden. Dies soll im Folgenden an einigen Beispielen dargestellt werden.

7.1 Belastungen an Hon- und Stützleisten

Das Honen von weichen Werkstoffen (insbesondere ungehärtetem Stahl) gilt als schwierig, da dabei Probleme in Form des Zusetzens von Honleisten auftreten können. Dabei verschmieren die Leisten mit Material des Werkstücks und werden unbrauchbar. Dies war auch in eigenen Versuchen bei der Verwendung des unbehandelten Stahls 16MnCr5, Härte HRC 20, zu beobachten. Beschädigt wurde aber nicht nur die Honleiste, das Werkzeugversagen ging im Gegenteil meist von einer der beiden Führungsleisten aus und führte zum Ausfall des gesamten Werkzeugs. Da stets dieselbe Führungsleiste für das Werkzeugversagen verantwortlich war, liegt die Vermutung nahe, dass die Kräfte am Honwerkzeug aufgrund der unsymmetrischen Winkelverteilung nicht gleichmäßig verteilt sind.

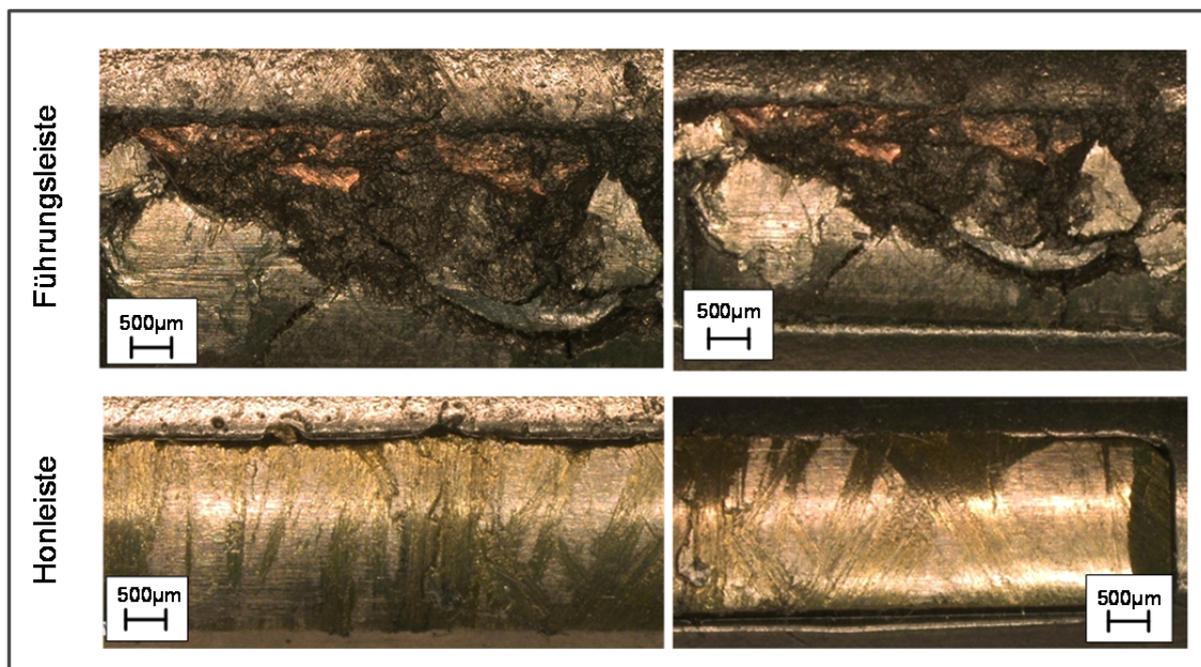


Abbildung 7.1: Beschädigungen am Honwerkzeug [Schm13].

An der versagenden Führungsleiste 2 kommt es zu Materialausbrüchen, die dann zu einem vollständigen Versagen des Werkzeugs führen (vgl. Abbildung 7.1). Dabei brechen Teile der Führungsleiste aus und geraten zwischen Werkstück und Werkzeug.

Verwendet man die in Kapitel 6 vorgestellten Formeln für die Kräfte an der Honleiste und den beiden Führungsleisten, so erkennt man, dass die Belastungen tatsächlich unterschiedlich verteilt sind. Die Honleiste, die den Abtrag leisten soll, ist erwartungs- und wunschgemäß am stärksten belastet. Aber auch die beiden Führungsleisten sind stark, außerdem unterschiedlich, belastet. Die stärker belastete Führungsleiste 2 (vergleiche Abbildung 5.13) ist in den Versuchen ausgefallen. Für die Berechnung der Belastungen an den einzelnen Leisten wird die Bearbeitung von weichen Werkstoffen unter Standardbedingungen bei einer Konuskraft von 80N herangezogen. Damit ergeben sich die radiale Kraft an der Honleiste nach Formel 6.9 zu 315N, die Kraft an der Führungsleiste 1 zu 190N und die Kraft an der Führungsleiste 2 zu 250N. Die Führungsleiste 2 ist also deutlich stärker beansprucht als Führungsleiste 1. Da sie dafür nicht ausgelegt ist, hält sie den auftretenden Belastungen nicht stand, es kommt zum Versagen. Die Führungsleiste 1 ist dagegen deutlich geringer beaufschlagt und zeigt keine Probleme. Es stellt sich die Frage ob eine veränderte Winkelverteilung oder eine Veränderung der Führungsleisten und damit ihrer Reibkoeffizienten die Situation verbessern können.

Verändert man die Winkelverteilung ergibt sich ein komplexes Bild. Verändert werden können dabei der Winkel ε zwischen der Honleiste und der Führungsleiste 1 sowie der Winkel δ zwischen der Honleiste und der Führungsleiste 2. Abbildung 7.2 zeigt die Kraft auf Führungsleiste 1 bei steigendem Winkel δ zwischen Hon- und Führungsleiste 2 für unterschiedliche Winkel ε zwischen Hon- und Führungsleiste 1. Die Kraft wird umso größer, je höher der Winkel δ wird. Der Effekt scheint dabei umso stärker, je kleiner der Winkel ε wird. Je höher ε gewählt wird, desto geringer wird die Kraft auf die Führungsleiste 1. Abbildung 7.3 zeigt die Verhältnisse für die Führungsleiste 2. Hier bestätigt sich der Einfluss von Winkel ε . Je höher ε wird, desto niedriger werden hier die Kräfte auf die Führungsleiste 2. Alle 3 Kurven treffen sich für einen Winkel δ von etwa 185° bei einem Wert von etwa 320N. Das Niveau der Kräfte auf die Führungsleiste 2 liegt generell etwas höher als auf die Führungsleiste 1. Ein Optimum stellt sich für den Verlauf der Kräfte bei einem Winkel ε von 150° und einem

Winkel δ von 210° ein. Die Kräfte auf beide Führungsleisten sind dabei mit jeweils etwa 180N fast gleich.

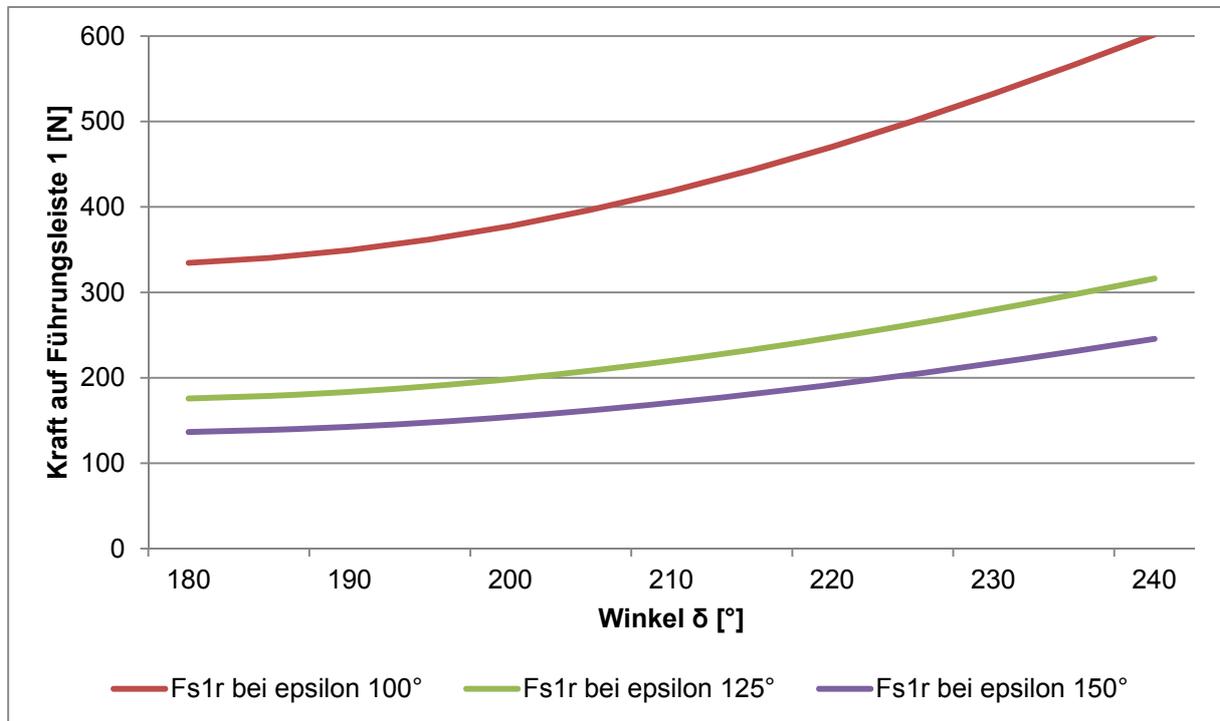


Abbildung 7.2: Kraft auf Führungsleiste 1 bei veränderten Winkelverteilungen.

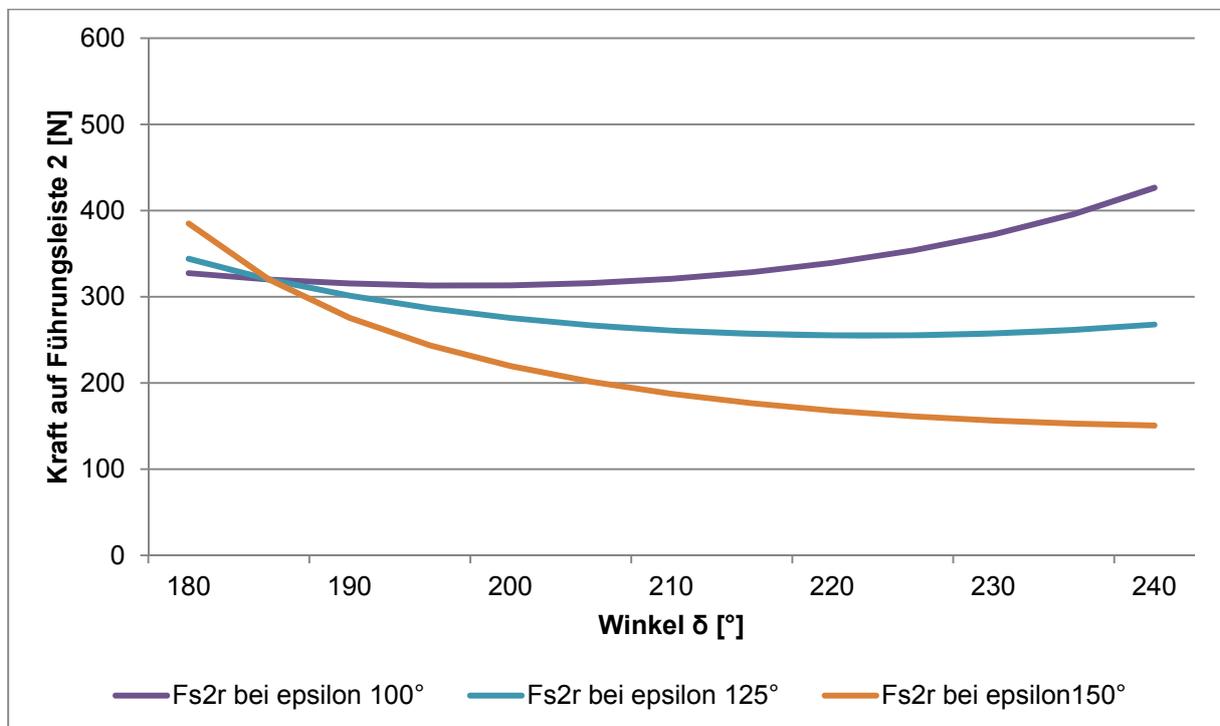


Abbildung 7.3: Kraft auf Führungsleiste 2 bei veränderten Winkelverteilungen.

Insgesamt lässt sich keine pauschale Aussage bezüglich einer optimierten Winkelanordnung treffen. Durch die komplexen Zusammenhänge mit verschiedenen beeinflussbaren Winkeln und dem Einfluss der Tangentialkraftkoeffizienten wird dies verhindert. Eine symmetrische Verteilung erscheint nicht sinnvoll. Zum einen sind aus der Vergangenheit Probleme durch ein Aufschwingen des Werkzeugs bekannt, zum anderen bietet sich an dieser Stelle mit einem Winkel ε von 120° und einem Winkel δ von 240° keine optimierte Kraftverteilung aus. Die Wahl eines größeren Wertes für ε scheint aber insgesamt sinnvoll. Für einen Winkel ε von 150° und einen Winkel δ von 210° ergeben sich ausgeglichene Kräfte auf die beiden Führungsleisten. Dies scheint also eine deutlich bessere Winkelanordnung dazustellen. Allerdings müsste überprüft werden, ob durch die konstruktive Veränderung des Werkzeugs andere Probleme während des Prozesses auftauchen.

Eine weitere Möglichkeit zur Optimierung besteht in der gezielten Beeinflussung der Führungsleisten. Zunächst soll angenommen werden, dass beide Führungsleisten identisch sind und somit denselben Tangentialkraftkoeffizienten μ_s haben. Abbildung 7.4 zeigt, dass mit zunehmendem Tangentialkraftkoeffizienten μ_s an den Führungsleisten die Kraft F_{s2r} dagegen deutlich abnimmt. Die Kraft F_{s1r} nimmt dagegen nur leicht ab.

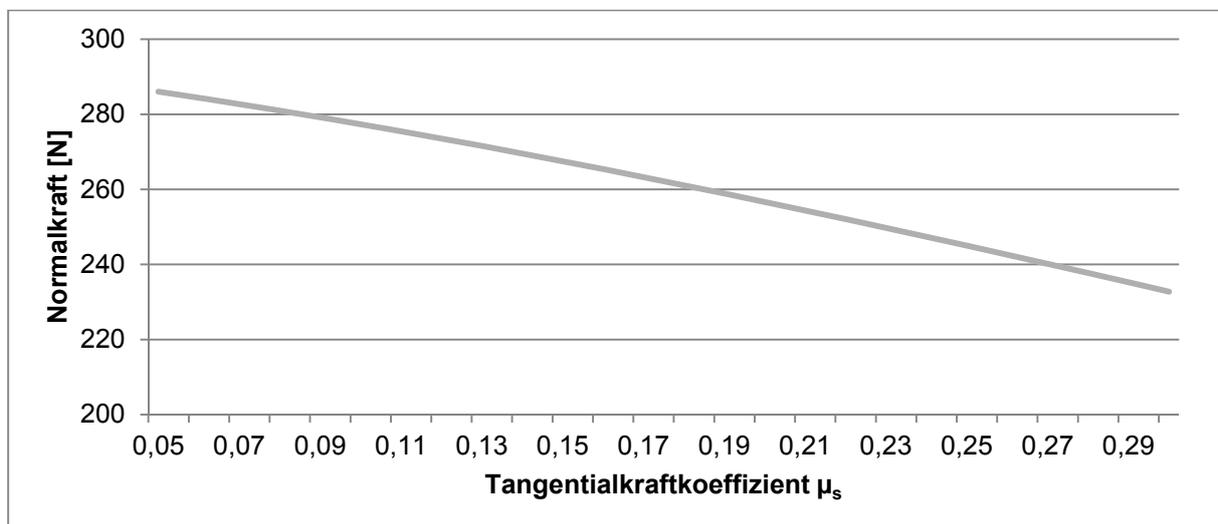


Abbildung 7.4: Kräfte auf die Führungsleisten bei verändertem Reibkoeffizienten μ_s .

Ein hoher Koeffizient μ_s scheint also sinnvoll zu sein, da er die Belastung an Führungsleiste 2 deutlich verringern kann und die an Führungsleiste 1 nur leicht verändert. Allerdings bleibt dabei zu beachten, dass die Führungsleisten nicht am Abtrag

beteiligt sein sollen, dies läuft der Forderung nach einem möglichst hohen Reibkoeffizienten entgegen. Im Folgenden soll ein Beispiel für die Verwendung unterschiedlicher Führungsleisten aufgezeigt werden.

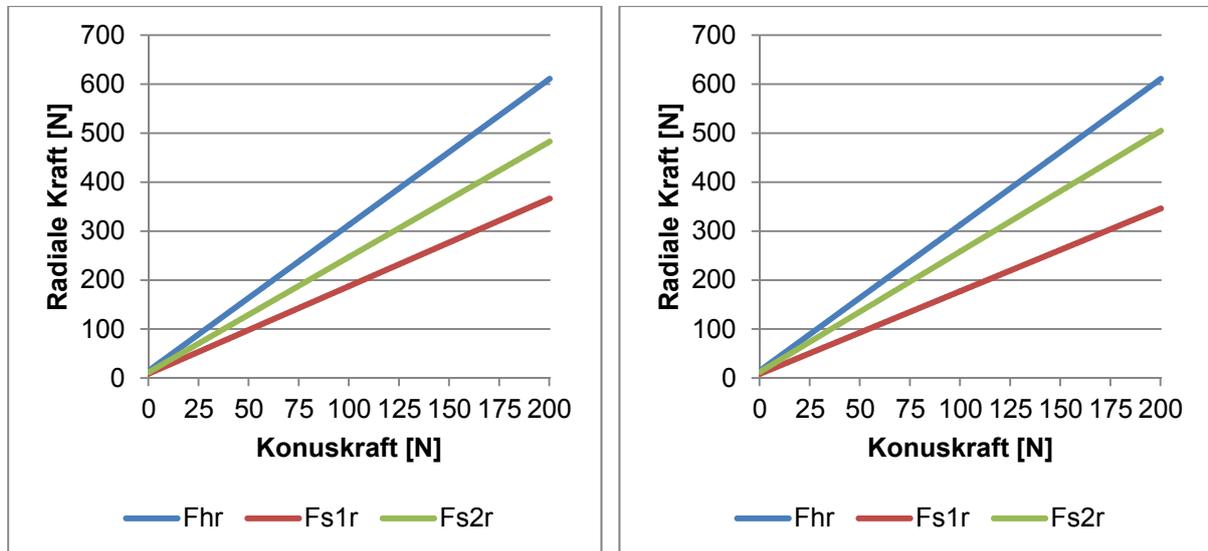


Abbildung 7.5: Belastungen von Hon- und Führungsleisten bei Verwendung von Diamant- (links) und Hartmetallführungsleisten (rechts).

Gemäß Tabelle 4.3 wurden die Tangentialkraftkoeffizienten für die Bearbeitung von weichen Werkstoffen sowohl für Diamant- als auch für Hartmetallführungsleisten bestimmt. Die Ergebnisse sind Tabelle 5.1 zu entnehmen. Abbildung 7.5 stellt die Ergebnisse für die Berechnung der Belastungen bei Verwendung der verschiedenen Führungsleisten dar. Die Konuskraft wird dabei zwischen 0N und 200N variiert, die Verläufe der radialen Kräfte auf die Hon- und Führungsleisten sind gezeigt. Bei der Verwendung der Hartmetallführungsleisten ergibt sich aufgrund des geringeren Tangentialkraftkoeffizienten theoretisch eine schlechtere Verteilung der Kräfte. Die Kraft auf Führungsleiste 2 ist hier höher, während die Kraft auf die Führungsleiste 1 nochmal geringer wird. Die Verwendung von Diamantleisten scheint also vorteilhafter zu sein. Die für eine Konuskraft von 100N berechneten Werte in beiden Fällen sind in Tabelle 7.1 zusammengefasst. Sie zeigen dass die Honleiste am stärksten beansprucht ist, Führungsleiste 2 ist in beiden Fällen deutlich stärker beansprucht als Führungsleiste 1. Die Verwendung der Hartmetalleisten mit einem geringeren Tangentialkraftkoeffizienten bringt keine Veränderung der radialen Kraft auf die Honleiste, aber eine Erhöhung der Kraft auf die Führungsleiste 2 sowie einen vergrößerten Unterschied der Belastungen auf die beiden Leisten.

Tabelle 7.1: Radiale Belastungen an Hon- und Führungsleisten.

Konuskraft 100N	Honleiste	Führungsleiste 1	Führungsleiste 2
Diamant-Führungsleisten	313	188	248
HM-Führungsleisten	313	177	260

Über eine geschickte Wahl der Hon- und Führungsleisten lassen sich also die Belastungen an den einzelnen Leisten gezielt beeinflussen. Denkbar ist auch die Verwendung von unterschiedlichen Führungsleisten. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge lassen sich aber keine allgemeinen Aussagen treffen. Vielmehr muss für jeden Anwendungsfall ein Optimum unter Berücksichtigung der jeweiligen Prozessparameter gefunden werden.

7.2 Ansätze zur modellbasierten Prozessregelung

Der heutige kraftgeführte Honprozess basiert auf der Messung und Regelung der Konuskraft F_k . Dies bedeutet aber eine indirekte Regelung, da eigentlich die radiale Kraft von der Honleiste auf die Bohrungswand konstant gehalten werden soll. Auf die indirekte Größe wird zurückgegriffen, da deren Messung wesentlich einfacher zu realisieren ist. Auf die Konuskraft wirken aber neben der radialen Kraft an der Honleiste auch Reibkräfte und Verformungen im System Werkzeug zu Honleiste und Trägheitseffekte in den Umsteuerbereichen. Daneben berücksichtigt die Regelung nach heutigem Stand die unterschiedlichen Bedingungen in den einzelnen Phasen nicht. Dazu gehören die unterschiedlichen Kontaktbedingungen von Honleiste zu Bohrungswand ebenso wie die Abbremsvorgänge in den Umsteuerphasen. Über die oben dargestellten Modelle zum Zusammenhang zwischen Konuskraft und radialer Kraft auf die Honleiste können alternative Regelansätze aufgebaut werden. Dabei kann nun eine konstante radiale Kraft auf die Honleiste als Führungsgröße dienen, der dafür notwendige Verlauf der Konuskraft kann berechnet werden. Ein Beispiel für einen gemäß den Formeln aus Kapitel 6.3 berechneten Soll-Verlauf der Konuskraft ist in Abbildung 7.6 zu sehen. Zugrunde gelegt werden die Standardparameter und –bedingungen für das Honen von gehärtetem Stahl.

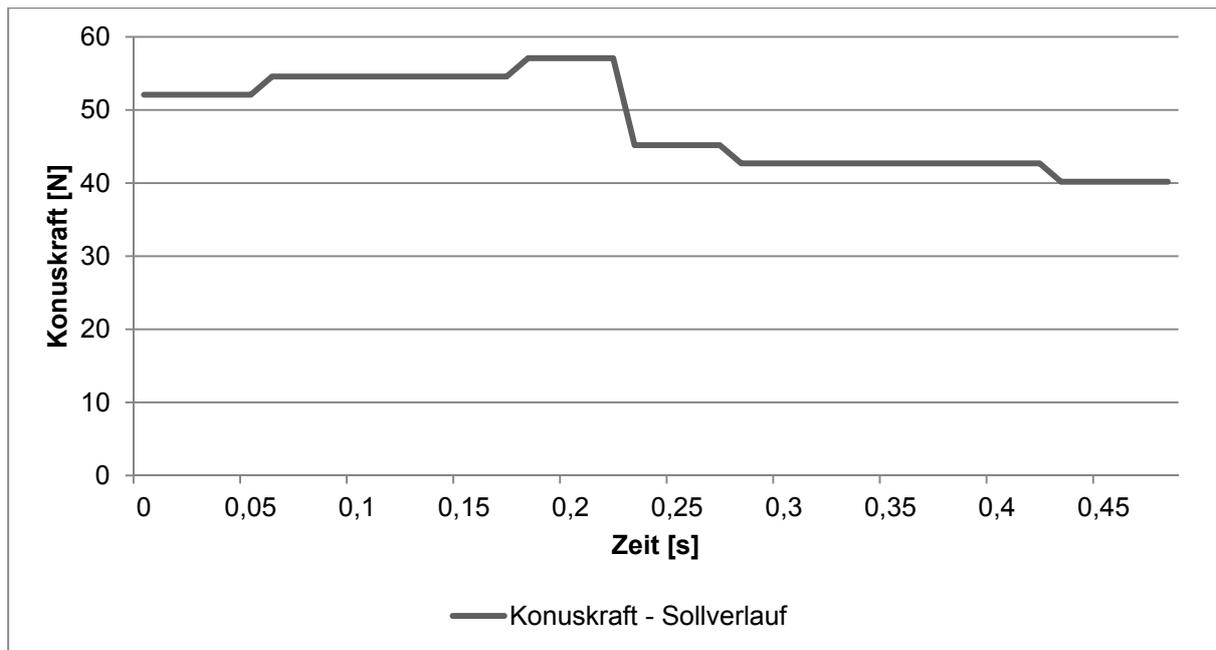


Abbildung 7.6: Sollverlauf der Konuskraft für eine konstante radiale Kraft auf die Honleiste.

Die radiale Kraft auf die Honleiste soll dabei konstant auf 200N gehalten werden. Über die Berechnung ergeben sich in den unterschiedlichen Phasen unterschiedliche Sollwerte für die Konuskraft. Abbildung 7.6 zeigt die Sollkraft über einen Hub. In den Phasen mit Aufwärtsbewegung liegen die Sollwerte höher als in den Phasen der Abwärtsbewegung. Das liegt daran, dass die Gewichtskräfte im Fall der Aufwärtsbewegung gegenhalten, im Fall der Abwärtsbewegung mithelfen. In den Umsteuerphasen sind außerdem Trägheitseffekte zu berücksichtigen. Über die Zustellung der Honleiste kann die Konuskraft einfach beeinflusst werden um die jeweiligen Vorgabewerte zu erreichen.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Regelung über die einfach zu messende Größe des Momentes dar. Auch hier liegt ein direkter Zusammenhang zur radialen Kraft auf die Honleiste vor. Es kann daher auch mit einem konstant vorgegebenen Moment gearbeitet werden. Das Moment kann dabei direkt als Maschinengröße (Spindel-drehmoment, vgl. [ScMB14]) gemessen werden, ein zusätzlicher Sensor, der die Konuskraft misst, ist damit nicht mehr notwendig. Hier ergeben sich weniger Fehlerquellen, grundsätzlich jede Maschine könnte außerdem zum kraftgeführten Honen herangezogen werden.

Ein Problem bleibt bei der Verwendung der oben beschriebenen Formeln, dass Verformungen nicht berücksichtigt sind. Die entstehenden Fehler sind aber hinreichend

klein. Eine weitere Frage ist die nach der Umsetzbarkeit in der Praxis. Für jede Kombination von Honleiste, Werkstoff und Kühlschmierstoff müssen hier zunächst die Systemparameter bekannt sein. Dies ist, insbesondere im Falle der Tangentialkraftkoeffizienten und der Reibkoeffizienten im Werkzeug, nicht gegeben und nur mit hohem Aufwand zu ermitteln. Die Regelung setzt außerdem eine hohe Dynamik der Steuerung voraus.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt zunächst grundlegende Betrachtungen zum Honen an. Das Augenmerk liegt dabei auf der Bearbeitung von Präzisionsbohrungen in einem Durchmesserbereich von 5mm bis 20mm. Bearbeitet werden Bohrungen aus weichem beziehungsweise gehärtetem Stahl mit Honleisten mit Schneidkörnern aus Diamant beziehungsweise kubischem Bornitrid. Nach einigen grundlegenden Bemerkungen zum Honprozess und der Betrachtung von wichtigen Einflussparametern werden die Unterschiede zwischen weg- und kraftgeführtem Honen bei elektromechanischer Zustellung untersucht. Dabei wird auf die Vorteile der einzelnen Verfahrensvarianten eingegangen, das große Potential des kraftgeführten Honens wird aufgezeigt. Da die Kraftmessung derzeit beim kraftgeführten Honen von kleineren Bohrungen nur indirekt oberhalb der Zustelleinheit erfolgt, ist sie fehlerbehaftet. Aus diesem Grund kann das Verfahren sein gesamtes Potential derzeit nicht ausschöpfen. Eine Lösung dieses Problems liegt in der genauen Kenntnis der Übertragungswege und damit der Möglichkeit zur Berechnung der radialen Kraft auf die Honleiste. In der Arbeit werden daher verschiedene Ansätze zur Modellbildung beim Honen auf ihre Eignung zur Beschreibung der Kraftverhältnisse hin betrachtet. Angefangen bei einem sehr einfachen bekannten Modell unter Vernachlässigung sämtlicher Reibkräfte, Trägheitseffekte und Deformationen werden durch Vergleich von gemessenem und berechnetem Verlauf des Moments die Defizite aufgezeigt. Das Moment wurde zur Überprüfung der Modellansätze herangezogen, da es unmittelbar an der Spannvorrichtung des Werkstücks gemessen werden kann. Ein Modell unter Berücksichtigung von Reibkräften zeigt eine deutlich bessere Übereinstimmung von gemessenem zu berechnetem Moment. Die Detailbetrachtung zeigt aber auch hier noch erhebliche Abweichungen, die auf die Vernachlässigung von Trägheitseffekten zurückzuführen sind. Eine weitere Modellergänzung wird daher durchgeführt. Neben den Reibkräften werden nun auch Trägheitseffekte und die an der Honleiste vorliegenden Axialkräfte mit in die Betrachtung aufgenommen. Die Komponenten der Zustelleinheit werden nach wie vor als ideal starr angenommen. Das letzte Modell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen berechnetem und gemessenem Momentenverlauf. Abweichungen, die noch vorliegen, können mit vernachlässigten Deformationen, der nicht berücksichtigten Aufweitung des Durchmessers während des Prozesses und der einfachen Aufteilung der Axialkraft auf die Hon- und die beiden Führungsleisten

erklärt werden. Das zuletzt eingeführte Modell erfordert zur Berechnung und Betrachtung aber einen erheblich höheren Aufwand. Insgesamt lassen sich durch Anwendung der Modelle Ansätze zur Verbesserung des kraftgeführten Honens finden. Darüber hinaus kann die Betrachtung des Momentes um das Honwerkzeug zur Auslegung von neuen Honwerkzeugen genutzt werden. Variiert werden können dabei die Winkelverteilung der Hon- und Führungsleisten sowie die Tangentialkraftkoeffizienten der einzelnen Leisten, um beispielsweise einem Werkzeugversagen durch eine gleichmäßigere Belastung der Leisten vorzubeugen. Die Modelle können außerdem zu einer verbesserten Prozessregelung genutzt werden. Die Grundidee ist hierbei, die radiale Kraft der Honleiste auf die Bohrungswand konstant zu halten. Durch die oszillierende Bewegung der Honleiste variiert die Kontaktfläche zwischen Honleiste und Bohrungswand aber während des Prozesses. Die Regelung des Schnittdrucks könnte hier ein weiterer Entwicklungsschritt sein.

LITERATURVERZEICHNIS

- [Abel05] Tobias Abeln, „Reibungsminimierung durch Laseroberflächenstrukturierung in Verbrennungsmotoren“, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren/62. Ausgabe, S. 398-409 , Vulkan Verlag Essen, 2005.
- [Abel07] Tobias Abeln, „Technik schützt Umwelt – Verbrauchsreduzierung durch Laserhonorverfahren“, in: Maschine und Werkzeug, Ausgabe Juni 2007, 108. Jahrgang, S. 24, Verlag Henrich Publikationen GmbH, Gilching, 2007.
- [Alth82] Paul-Gerhard Althaus, „Leistungssteigerung beim Innenschleifen durch kubisches Bornitrid (CBN) und neue Maschinenkonzeptionen“, Dissertation, Universität Hannover, 1982.
- [AWF32] Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung, „Feinstbearbeitung – Polieren, Läppen, Honen, Preßpolieren, Polierdrehen“, Veröffentlichungen des Reichskuratoriums für Wirtschaftlichkeit Nr. 74, Beuth Verlag, Berlin, 1932.
- [BäSc10] Dirk Bähre, Christina Schmitt, „Analysis of Forces and Process Behaviour during the Honing of Bores“, Proceedings of the 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Japan, 2010.
- [BäSM12a] Dirk Bähre, Christina Schmitt, Uwe Moos, “Analysis of the Differences between Force Control and Feed Control Strategies during the Honing of Bores”, Proceedings of the 5th CIRP International Conference on High Performance Cutting, Switzerland, 2012.
- [BäSM12b] Dirk Bähre, Christina Schmitt, Uwe Moos, “Comparison of Different Approaches to Force Controlled Precision Honing of Bores”, Proceedings of NAMRI/SME, Vol. 40, South Bend/USA, 2012.
- [Berg90] Karl-Heinz Bergen, „Langhub-Innenrundhonen von Grauguß und Stahl mit einem elektromechanischen Vorschubsystem“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1990.
- [Berg91] Karl-Heinz Bergen, „Neuere Entwicklungen bei Honmaschinen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1991.

- [BiJK14] Biermann, D., Joliet, R., Kansteiner, M., „Experimentelle und simulative Untersuchung des Langhubhonnens“, Teil 1 und 2, dihw Magazin, Ausgaben 1 (S. 30-36) und 2 (S. 38-41), 2014.
- [Bods91] Bodschwinn, H., „Rauheitsmesstechnik und Kennwerte“, In: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1991.
- [Born69] Günter Bornemann, „Honen von gehärtetem Stahl und Kokillengrauguß mit Korund- und Diamanthonleisten“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1969.
- [BrGi03] Brinksmeier, E., Giwerzew, A., „Chip formation mechanisms in grinding at low speeds“, CIRP Annals, Vol. 52/1, S. 153-258, 2003.
- [BuRe02] Burkhard, G., Rehsteiner, F., „High Efficiency Abrasive Tool for Honing“, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 51, Issue 1, 2002.
- [BuZB02] Burkhard, G., Zigerlig, B., Boretius, M., „Spanen mit definiert angeordneten Diamant- oder cBN-Körnern, IDR 36 (2002) Nr. 2.
- [BuVi13] Irene Buj-Corral, Joan Vivancos-Calvet, „Improvement of the manufacturing process of abrasive stones for honing“, International Journal for Advanced Manufacturing, Springer Verlag, London, 2013.
- [ChCH90] Chattopadhyay, A. K., Chollet, L., Hintermann, H. E., „On Performance of Chemically Bonded Single-Layer CBN Grinding Wheel“, Annals of the CIRP, Vol. 39/1, pp. 309-312, 1990.
- [DHGW14] Dröder, K., Hoffmeister, H.-W., Große, T., Winter, M., Herrmann, C., „Umweltverträgliches Honen mit alternativen Kühlschmierstoffen“, 3rd International Chemnitz Manufacturing Colloquium ICMC 2014, Proceedings Part 1, S. 633-646.
- [DIN4287] DIN EN ISO 4287, „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.

- [DIN4288] DIN EN ISO 4288, „Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1998.
- [DIN 8589-14] DIN 8589-14:2003-09, „Honen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN8580] DIN 8580:2003-09, „Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN 10084] DIN EN 10084:2008-06, „Einsatzstähle – Technische Lieferbedingungen“, DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008.
- [Dyer67] H. B. Dyer, „Diamanten schleifen Stahl Teil 1“, Diamant Information M7, DeBeers Industrial Diamond Division, 1967.
- [Dyer68] H. B. Dyer, „Diamanten schleifen Stahl Teil 2“, Diamant Information M18, DeBeers Industrial Diamond Division, 1969.
- [Feld22] Franz M. Feldhaus, „Leonardo der Techniker und Erfinder“, Eugen Diederichs Verlag, Jena, 1922.
- [FEPA] Federation of European Producers of Abrasives, „Standard for Superabrasive Grain Sizes“, FEPA 61-2009, 1997, revised 2009.
- [Flor89] Gerhard Flores, „Bürstthonen von Kolbenlaufbahnen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1989.
- [Flor92] Flores, G., „Grundlagen und Anwendungen des Honens“, Vulkan Verlag Essen, 1992.
- [Haas55] Gerhard Haasis, „Untersuchungen über wirtschaftliches Honen“, Dissertation, Universität Stuttgart, 1955.
- [Haas56] Gerhard Haasis, „Honen im Transfer-System“, Werkstatt und Betrieb, 89. Jahrgang, Heft 8, S. 435-438, 1956.

- [Haas80] Haasis, Gerhard, „Honen“, in: G. Spur, Th. Stöferle, „Handbuch der Fertigungstechnik, Band 3/2 Spanen, S. 316 ff., Carl Hanser Verlag, 1980.
- [Haas91] Gerhard Haasis, „Zeitgemäße Vorrichtungsauführungen beim Langhub- und Dornhonen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, S. 73-99, TU Braunschweig, 1991.
- [Hart56] Carl Friedrich Alexander Hartmann, „Vollständiges Handbuch der neuesten englischen Werkzeuglehre; Band 2 - Das Schleifen und Polieren“, Voigt Verlag, Weimar, 1856.
- [Höhn91] L. Höhne, „Der Werkstoffabtrag beim Honen von Keramik“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, S. 258-268, TU Braunschweig, 1991.
- [HoMe04] H.-W. Hoffmeister; Menze, B.; „Einsatz von Sensorik beim Honen und Regelung von Honprozessen“, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren/61. Ausgabe, S. 261-279, Vulkan Verlag Essen, 2004.
- [InTH93] Inasaki, I., Tönshoff, H. K., Howes, T.D.; „Abrasive Machining in the Future“, Annals of the CIRP Vol.42/2, S. 723-732, 1993.
- [Juch84] Juchem, H. O., „Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in metallischen Werkstücken mit Diamant und CBN“, Industriediamanten Rundschau IDR, Band 18, Nummer 3, S. 173-185, 1984.
- [Kapp91] G. Kappmeyer, „Prozessintegrierte Qualitätssicherung“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1991.
- [Kapp95] G. Kappmeyer, „Hochfrequenzhonen – Technologie und Anwendung“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 3. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1995.
- [Kess53] Günter R. Kessler, „Honen von Bohrungen“, Dissertation, TH Stuttgart, 1953.

- [KIFI01a] Ulrich Klink, Gerhard Flores, „Honen – Fortschritte durch optimierte Werkzeuge und Prozesse, Fachgebiete in Jahresübersichten Teil 1“, VDI-Z 143 , Nr.6, S. 49–56 , VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [KIFI01b] Ulrich Klink, Gerhard Flores, „Honen wird zukunftsfähig durch neue Verfahrenskombinationen, Fachgebiete in Jahresübersichten Teil 2“, VDI-Z 143 (2001), Nr.7, S. 52-67, VDI Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [KIFI04] Ulrich Klink, Gerhard Flores, „Paarungshonen von hochgenauen Passungen“, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren/61. Ausgabe, S. 280-285 , Vulkan Verlag Essen, 2004.
- [Klin83] Ulrich Klink, „Fachgebiete in Jahresübersichten“, VDI-Z, Band 125, Nummer 14, VDI Verlag, Düsseldorf, 2008.
- [KIKö05] Klocke, F., König, W., „Fertigungsverfahren 2 – Schleifen, Honen, Läppen“, Springer Verlag Berlin, 2005.
- [KoLT97] Komanduri, R., Lucca, A.D., Tani, Y., „Technological Advances in Fine Abrasive Processes“, Annals of the CIRP Vol. 46/2, S. 545-596, 1997.
- [Kuch07] Horst Kuchling, „Taschenbuch der Physik“, 19. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2007.
- [Mask91a] Peter Maskus, „Prozessintegrierte Qualitätsprüfung und Prozessregelung beim Honen“, Dissertation, TU Braunschweig, 1991.
- [Mask91b] P. Maskus, „Spanbildung beim Honen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1991.
- [Menz08] Bernd Menze, „CVD-Diamant-Werkzeuge zur geometrisch unbestimmten Mikrozerspannung von gehärtetem Stahl“, Dissertation, TU Braunschweig, 2008.
- [Mich95] Andreas Michel, „Kühlschmierstoffe für das Honen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 3. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1995.
- [MiJa10] J. P. Misra, P. K. Jain, „Experimental Investigation on Precision Finishing of Spur Gears by Pulse Electrochemical Honing

- (PECH) Process“, Annals of DAAAM, DAAAM International, Vienna, Austria, 2010.
- [MiJD11] J. P. Misra, P. K. Jain, D. K. Dwivedi, “Precision Finishing of Gears by Electrochemical Honing Process: A State of the Art Review”, Journal of Advanced Manufacturing Systems, Vol. 10, No. 2, p. 309-327, World Scientific Publishing Company, 2011.
- [Mush80] Heinrich Mushardt, „Beitrag zur Optimierung mehrstufiger Schleifprozesse“, Dissertation, TU Braunschweig, 1980.
- [Mush86] Harald Mushardt, „Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen“, Dissertation, TU Braunschweig, 1986.
- [Nage90] Nagel, Peter, Nagel, Wolf, Patentschrift DE 3336626 C2.
- [Paff11] Kai Uwe Paffrath, „Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren“, Dissertation, TU Dortmund, 2011.
- [Plas95] M. Plass, „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.
- [Plas99] Martin Plass, „Beitrag zur Optimierung des Honprozesses durch den Aufbau einer Honprozessregelung“, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1999.
- [Pauk92] Eberhard Pauksch, „Zerspantechnik“, 9. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1991.
- [Paul91] Rainer Paulmann, „Schleifen, Honen, Polieren“, Dissertation, TU Braunschweig, VDI Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [Purs63] Günter Pursche, „Prüfung der Bindungshärte von keramisch gebundenen Zieh- und Feinziehschleifsteinen“, Fertigungstechnik und Betrieb, Band 13, Nummer 12, S. 769-772, Verlag Technik, Berlin, 1963.
- [Purs65] Günter Pursche, „Kennzeichnung der Qualität von Ziehschleifsteinen mit Hilfe des E-Moduls“, Fertigungstechnik und Betrieb, Band 15, Nummer 4, S. 240-245, Verlag Technik, Berlin, 1965.

- [Raff58] Gerd Rafflenbeul, „Das Schleifen von Hartmetall mit Diamant-Schleifscheiben unter Berücksichtigung von Hartmetall-Abschliff, Schleifscheibenverschleiß, Flächenrauhtiefe und Schartentiefe der Schneidkanten“, Dissertation, TU Braunschweig, 1958.
- [SaLa89] E. Saljé, G. Lang, „Moderne Schleiftechnologie und Schleifmaschinen“, Vulkan Verlag, Essen, 1989.
- [SaMM10] Sabri, L., Mezghani, S., El Mansori, M., A study on the influence of bond material on honing engine cylinder bores with coated diamond stones, *Surface and Coatings Technology* 205, Seite 1515-1519, 2010.
- [SaMu83] Saljé, Ernst; Mushardt, Harald; „Untersuchungen über den Prozessablauf beim Innenrundhonen anhand von Zerspankraftmessungen“, *VDI-Z* 125, Nr. 12, Juni 1983.
- [SaSe87] Saljé, Ernst; von See, Michael; „Process-Optimization in Honing“, *Annals of the CIRP*, Vol.36/1, S.235-239, 1987.
- [SBFK11] C. Schmitt, D. Bähre, K. Forsch, H. Klein, „Feinstbearbeiten hochgenauer Bohrungen durch Honen“, *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren/65*. Ausgabe, S. 259-271, Vulkan Verlag Essen, 2011.
- [SBMF13] C. Schmitt, D. Bähre, U. Moos, K. Forsch, H. Klein, R. Maier, R. Regler, „Kraftregelung zur Erhöhung der Prozessstabilität und Genauigkeit beim Bohrungshonen“, *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren/66*. Ausgabe, S. 333-341, Vulkan Verlag Essen, 2013.
- [ScBä13] C. Schmitt, D. Bähre, „An Approach to the Calculation of Process Forces during the Precision Honing of Small Bores“, *Procedia CIRP*, Volume 7, 2013, Pages 282-287, 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems CMS 2013, Setubal, Portugal, May 29-31, 2013.
- [ScBä14] C. Schmitt, D. Bähre, „Analysis of the Process Dynamics for the Precision Honing of Bores“, *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems CMS 2014*, Windsor, Canada, 2014.

- [Schl13] N. N., "Neuer Kühlschmierstoff optimiert das Hochgenauigkeits-honen", Schleifen und Polieren, Ausgabe 4/2013, Fachverlag Moeller, 2013.
- [Schm13] C. Schmitt, "Influences on the Precision Honing of Small Bores for Unhardened Steel", In: Bähre, D. (Herausgeber), Recent Advances in Abrasives Research, S. 267-284, Nova Publishers, 2013.
- [ScMB14] C. Schmitt, U. Moos, D. Bähre, „Ansatz zur Modellbildung beim Präzisionshonen von Bohrungen“, Proceedings of the International Chemnitz Manufacturing Colloquium 2014, Part 1, S. 833-850.
- [ScSm04] J. Schmidt, C. Schmidt, A. Mehr, „Simulation von Formhonnprozessen“, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 61. Ausgabe, Vulkan Verlag, Essen, 2004.
- [Stef83] K. Steffens, „Thermomechanik des Schleifens“, Dissertation, RWTH Aachen, 1983.
- [TöAB00] Tönshoff, H. K., Arendt, C., Ben Amor, R., „Cutting of hardened steel“, Annals of the CIRP Vol. 49, S. 547-566, 2000.
- [Toli08] Tolinski, Michael; "High-Performance Honing", Manufacturing Engineering, Vol. 140, Nr. 6, Juni 2008.
- [Töns70] Tönshoff, Torsten, "Formgenauigkeit, Oberflächenrauheit und Werkstoffabtrag beim Langhubhonen", Dissertation, Universität Karlsruhe, 1970.
- [Uebe94] Peter Uebelhör, „Inprocess-Geometriemessung beim Honen“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1994.
- [ViMO85] H. Victor, M. Müller, R. Opferkuch, „Zerspantechnik Teil III“, wt Weiterbildung Technik 5, Springer Verlag, Berlin, 1985.
- [Vits85] Rudolf Vits, „Technologische Aspekte der Kühlschmierung beim Schleifen“, Dissertation, RWTH Aachen, 1985.
- [Voig57] H. Voigt, „Das Zieh Schleifen (Honen)“, Fachvortrag auf der Lehrschau der Technologie, Leipzig, 1957.
- [vSee89] Michael von See; „Optimierung von Honprozessen auf der Basis von Modellversuchen und –betrachtungen“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1989.

- [Wani52] Gilbert Waninger; „Bewegungsvorgänge und Kraftgrößen beim Feinhonen und die Entwicklung der Geräte“, Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1952.
- [Weig05] U.-P. Weigmann, „Honen der Kurbelwellenlagerbohung von Verbrennungsmotoren“, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62. Ausgabe, Vulkan Verlag, Essen, 2005.
- [WeKH96] Westkämper, E., Kappmeyer, H.-W., „Einfluss der Fertigungsverfahren Langhubhonen und Schleifen auf die Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften keramischer Bauteile“, Tagungsband Werkstoffe für die Fertigungstechnik – Symposium 5 – Werkstoffwoche, DGM, 1996.
- [WeLi05] E. Weiss, M. Libera, „Einfluss von technologischen Parametern auf den Honprozess von Zahnrädern - Ein Versuch zur mathematischen Beschreibung“, Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren, 62. Ausgabe, Vulkan Verlag, Essen, 2005.
- [Went57] R. H. Wentorf Jr., „Cubic Form of Boron Nitride“, The Journal of Chemical Physics 26, S. 956, 1957.
- [Went61] R. H. Wentorf Jr., „Synthesis of the Cubic Form of Boron Nitride“, The Journal of Chemical Physics 34, S. 809, 1961.
- [Werk24] N.N., „Polierwerkzeuge für Automobilzylinder“, Werkstattstechnik, Band 18, Heft 15, S. 410, 1924.
- [West91] E. Westkämper, „Entwicklung der Honbearbeitung in der Prozesskette“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 2. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1991.
- [West95] E. Westkämper, „Honen-Fertigungsverfahren mit Zukunft“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, 3. Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1995.
- [WeTr04] Webster, J., Tricard, M., „Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding“, Annals of the CIRP Vol. 53/2, S. 597-617, 2004.

-
- [Weul88] Weule, H., (submitted by Eversheim), "Improved Honing through Process Control", Annals of the CIRP, Band 37, Nummer 1, 1988.
- [Wien11] Andreas Wiens, „Formhonen von Zylinderlaufbahnen“, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2011.
- [WLF96] Weigmann, U.-P., Lierse, T., Friemuth, Th., Gäbler, J., Scherer, V., Eigenmann, B., „Schleifen und Honen keramischer Werkstoffe“, Tagungsband Werkstoffe für die Fertigungstechnik – Symposium 5 – Werkstoffwoche, DGM, 1996.
- [Wund89] W. Wunderlin, „Zahnradhohmaschinen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1989.
- [Yege86] Kemal Yegenoglu, „Berechnung von Topographiekenngößen zur Auslegung von CBN-Schleifprozessen“, Dissertation, RWTH Aachen, 1986.
- [Zell89] O. Zeller, „Honen von Zylinderlaufbahnen in übereutektischen AlSi-Legierungen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1989.
- [Zett74] Hans-Dieter Zettel, „Abtragssteigerung und Formverbesserung beim Langhubhonen“, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1974.
- [Zimm89] D. Zimmermann, „Kühlschmierstoffe für das Honen“, in: Qualität in der Fertigung – Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Fachtagung, Schriftenreihe des IWF, TU Braunschweig, 1989.