

Ulrich Klink
Martin Dellin
Sophia Kraushaar



Honen

Umweltbewusst und
kostengünstig fertigen

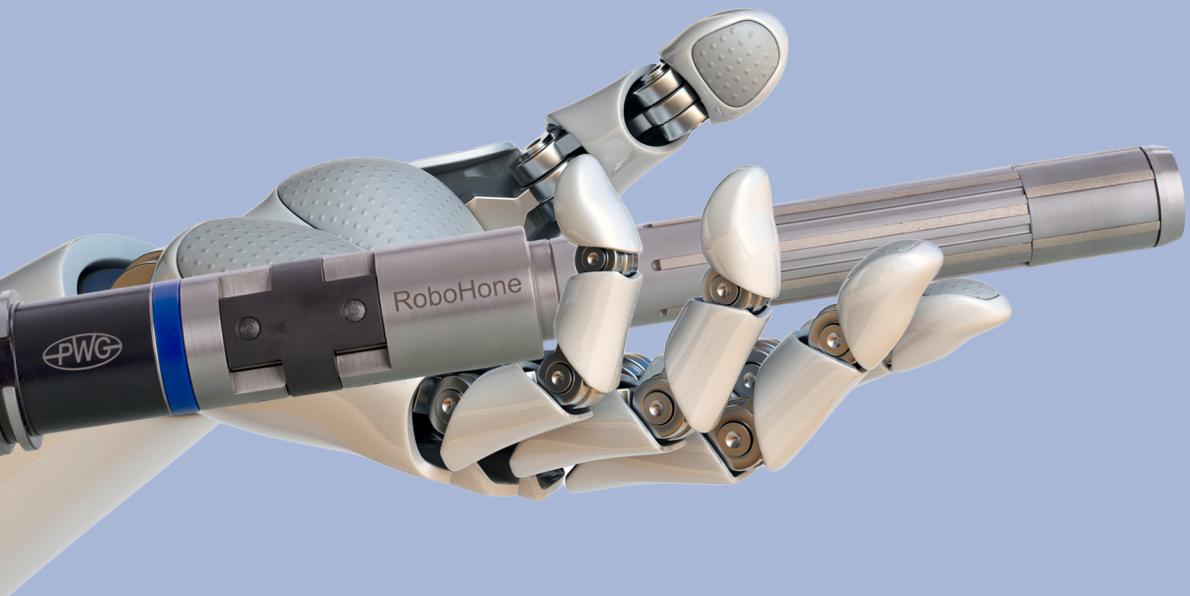


2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER



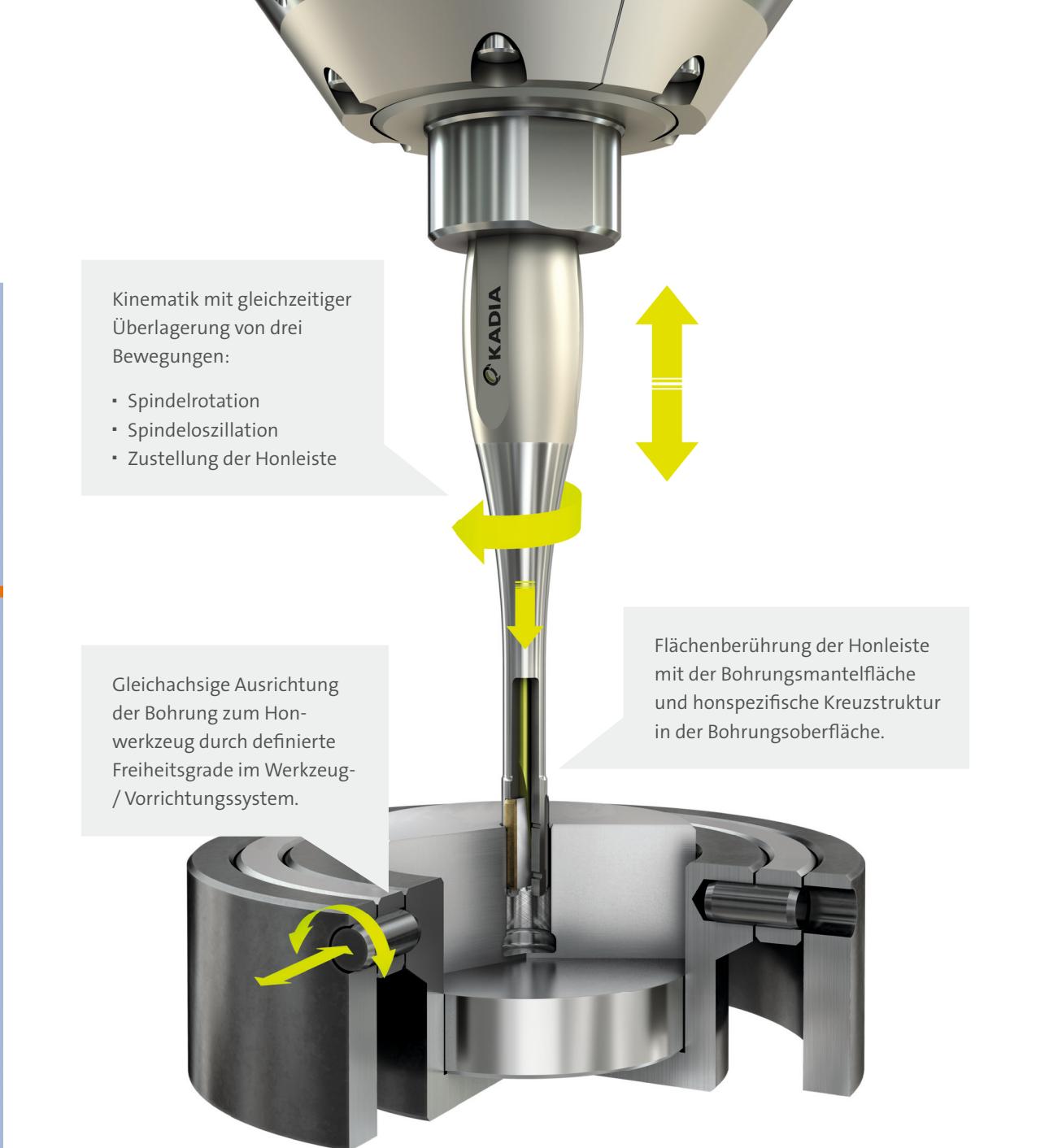
Honwerkzeuge in höchster Qualität



PWG Präzisions-Werkzeugbau Geißler GmbH

www.pwg-leutkirch.de





Kinematik mit gleichzeitiger Überlagerung von drei Bewegungen:

- Spindelrotation
- Spindeloszillation
- Zustellung der Honleiste

Gleichachsige Ausrichtung der Bohrung zum Honwerkzeug durch definierte Freiheitsgrade im Werkzeug-/Vorrichtungssystem.

Flächenberührung der Honleiste mit der Bohrungsmantelfläche und honspezifische Kreuzstruktur in der Bohrungsoberfläche.

WAS IST HONEN?

Animationsfilm auf unserem KADIA YouTube Kanal.



FRANKENSTEIN



Knapp 40 Jahre
Erfahrung
im Honen von
Bauteilen.

Präzision liegt uns im Blut.

**EFFIZIENT, INNOVATIV UND IM
 μ -BEREICH NICHT TOLERANT.**

www.frankenstein-praezision.de
vertrieb@frankenstein-praezision.de

+49 (0) 7122 825920

+++ HONEN OHNE HONMASCHINE +++

Klein- und Großserien-Fertigung mit
coolEX® und Xstep® Technologien auf Ihrer
Werkzeugmaschine



www.diahon.de

 **DIAHON**
HONTECHNIK FÜR BEARBEITUNGSZENTREN UND HONMASCHINEN





- Honmaschinen
- Honwerkzeuge
- Lohnhonen

Microcut Honing System



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-rYKKT-88RCt

plus.hanser-fachbuch.de



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Ulrich Klink
Martin Dellin
Sophia Kraushaar

Honen

Umweltbewusst und kostengünstig fertigen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

DIE AUTOREN:

Ulrich Klink, Dipl. Ing. (FH), über 30 Jahre Erfahrung als Leiter des Technologiezentrums und Mitglied der Geschäftsleitung der Maschinenfabrik Gehring GmbH & Co. KG. Seit 2009 Geschäftsführer des Dienstleistungsunternehmens iht-Klink Innovative Hon-Technologie.

Martin Dellin, M.Sc. seit 2014, als freier Mitarbeiter, Entwicklungsingenieur mit Schwerpunkt Messtechnik, des Dienstleistungsunternehmens iht-Klink Innovative Hon-Technologie.

Sophia Kraushaar, Studentin an der Universität Stuttgart, seit 2018 freie Mitarbeiterin des Dienstleistungsunternehmens iht-Klink Innovative Hon-Technologie.

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht, auch nicht für die Verletzung von Patentrechten, die daraus resultieren können.

Ebenso wenig übernehmen Autor und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt also auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Bibliografische Information der deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

www.hanserfachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: Melanie Zinsler

Titelmotiv: PWG Präzisions-Werkzeugbau Geißler GmbH, www.pwg-leutkirch.de

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: Druckerei Hubert & Co. GmbH und Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46717-0

E-Book-ISBN: 978-3-446-47007-1

Vorwort

Inspiriert zu diesem Fachbuch wurde ich durch die Tätigkeit als Mitverfasser des Werkes Heisel/Klocke/Uhlmann/Spur „Handbuch Spanen“ Carl Hanser Verlag, von Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann Technische Universität Berlin und von Herrn Dipl.-Ing. Volker Herzberg, Projektleiter beim Carl Hanser Verlag München.

Die im März 2015 erschienene 1. Auflage wird nun mit der vorliegenden, komplett überarbeiteten, aktualisierten und mit Innovationen der letzten Jahre wesentlich erweiterten 2. Auflage dem neusten Stand der Technik angepasst.

Basierend auf meiner langjährigen beruflichen Erfahrung auf dem Feinbearbeitungsgebiet des Honens beziehen sich die Ausarbeitungen, des spezifischen Fachwissens, auf das Langhubhonen in praxisnaher Aufbereitung. Zur Komplettierung der wichtigsten Honverfahren sind in kurzen Zügen auch das Kurzhubhonen und das Verzahnungshonen strukturiert aufbereitet worden.

Bei den Grundlagen wurden vor allem die fundamentalen Abtragsvorgänge und die Oberflächenanalytik weiter untersucht und entsprechend eingebracht. Die Oberflächenmesstechnik wurde transparent aufgearbeitet und mit einer zukunftsweisenden Ausarbeitung u. a. zur Honleisten- Schneidflächenmessung dem Stand der Technik angepasst.

Auch die neusten Innovationen auf dem Hongebiet wurden in Kooperation mit dem Produktionstechnischen Zentrum (PTZ) der TU Berlin entwickelt. Roboterhonen und definiertes Konditionieren von Honwerkzeugen sind Bestandteile dieser 2. Auflage.

In das Fachbuch neu aufgenommen wurden Anwendungen wie Bauteile für Voice-Coil-Motoren in der Beatmungstechnik, sowie Werkstücke zum Reiben und Honen mit Kombiwerkzeugen und auch die Feinbearbeitung kleinsten Durchmesserbereiche bis zu 0,015 mm.

Im komplexen Gebiet des Honens liegen nur sehr wenige zusammenhängende Publikationen in Form von Fachbüchern vor. In dieser 2. Auflage des Buches, ohne Vollständigkeitsanspruch, habe ich versucht, eine transparente Übersicht über die ständig gewachsenen Hontechniken zu geben.

Umfangreiche Literaturhinweise dienen zur weiteren Vertiefung dieser zukunfts-fähigen Technologien.

Dieses Buch wendet sich an Führungs- und Fachkräfte aus Forschung, Entwicklung, Konstruktion, Planung, Fertigung und Qualitätssicherung. Ebenso an Auszubildende und Studenten, sowie wissenschaftliche Mitarbeiter der Fach- und Hochschulen und entsprechenden Instituten.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den vielen Ansprech- und Diskussionspartnern der verschiedenen Unternehmen und Forschungsinstituten für die gute Zuarbeit zu diesem Buch bedanken.

Für das besondere Engagement gilt mein Dank meinem Mitarbeiter Herr Martin Dellin, M. Sc, mit dem Schwerpunkt der Ausarbeitung von Kapitel 6 „Oberflächenmessstechnik“, und meiner Mitarbeiterin Frau Sophia Kraushaar mit der Ausarbeitung von Abschnitt 2.6 „Kühlschmierstoffe“ und dem durchgängigen Design. Für die sehr fachkundige Zuarbeit und Durchsicht des umfangreichen Kapitel 6 sei Herrn Mario Adam der Firma Mahr, Oberhausen, bestens gedankt.

Eine gute Symbiose kam mit den Gastbeiträgen von den Herren Bussas, M. Sc., Dipl.-Ing. (FH) O. Stammen et al. der Firma NAGEL, Nürtingen und Dipl.-Wi.-Ing. H. Klein und Dr.-Ing. U. Moos der Firma KADIA, Nürtingen mit ihren eigenen Beiträgen zustande. Auch hierfür besten Dank.

Besonders möchten sich die Autoren beim Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) und des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der TU Berlin im Produktionstechnischen Zentrum Berlin, Prof. Eckart Uhlmann, für das Geleitwort bedanken.

Letztendlich gilt der Dank der Autoren dem Projektleiter und Lektor Dipl.-Ing. V. Herzberg vom Carl Hanser Verlag für die immer tatkräftige Unterstützung mit vielen individuellen Anregungen zu diesem Projekt.

Für Kritik und Anregungen sind die Autoren dankbar und nun,
viel Freude mit der Lektüre wünscht

Ulrich Klink, Dipl.-Ing. (FH)

Neuffen, im Frühjahr 2022

Inhalt

Vorwort	V
Geleitwort	XIII
1 Allgemeines	1
1.1 Geschichtliches	1
1.2 Einleitung und Übersicht der Honverfahren	4
2 Langhubhonen	9
2.1 Langhubhonvarianten mit Bauteilcharakteristika	10
2.1.1 Innenrundhonen	10
2.1.2 Innenprofilhonen	12
2.1.3 Außenrundhonen	12
2.1.4 Hybridverfahren	13
2.2 Verfahrensmerkmale	14
2.3 Maschinenarten	15
2.3.1 Vertikal-Langhubhonmaschinen	18
2.3.1.1 Baugrößenanordnung 1: Maschinen für Kleinserien - Ausführung A: Ø 25 - 370 mm, Ausführung B: Ø 60 - 110 mm	18
2.3.1.2 Baugrößenordnung 2: Maschinen für Kleinteile Ø 0,6 bis 10 mm	19
2.3.1.3 Baugrößenordnung 3: Maschinen für kleinere bis mittlere Ø von 8 bis 45 mm	21
2.3.1.4 Baugrößenordnung 4: Maschine für mittlere bis große Ø von 30 - 250 mm	23
2.3.1.5 Baugrößenordnung 5: Modulare Honbearbeitungszentren von Ø 70 - 125 mm ..	25

2.3.1.6	Baugrößenordnung 6: Großhonmaschinen für große Ø von 60 – 1500 mm	31
2.3.2	Horizontal-Langhubhonmaschinen	31
2.4	Honsysteme: Werkzeug- und Werkstück-Zuordnungen	33
2.4.1	Verbindungselemente mit Werkzeugaufnahme	36
2.4.2	Werkstückaufnahme (Vorrichtung)	36
2.4.2.1	Beispiele von „starren“ Werkstückaufnahmen gemäß Honsystem A	38
2.4.2.2	Beispiele von „schwimmenden“ Werkstück- aufnahmen gemäß Honsystem B	41
2.4.2.3	Beispiele von „kardanischen“ Werkzeug- aufnahmen gemäß Honsystem C	44
2.5	Werkzeugarten	46
2.5.1	Innenhon-Werkzeuge	47
2.5.1.1	Leisten-Honwerkzeuge, zustellbar während des Honens	48
2.5.1.2	Vollmantelwerkzeuge	56
2.5.1.3	Honwerkzeuge für Kleinstbohrungen	62
2.5.2	Außenhon-Werkzeuge	63
2.5.3	Honschneidbeläge	63
2.5.3.1	Schneidbeläge mit Diamant und CBN	67
2.5.3.2	Konstruktive Auslegung von Honbelägen	69
2.5.3.3	Konventionelle Aufbereitung von Honwerkzeugen mit Diamant- und CBN-Leisten-Systemen	70
2.5.3.4	Neue definierte Konditionierung von Honwerk- zeugen mit Diamant- und CBN-Leisten-Systemen	72
2.5.3.5	Konventionelle Schneidstoffe	77
2.6	Kühlschmierstoff	79
2.6.1	Nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe	81
2.6.2	Wassermischbare Kühlschmierstoffe	82
2.6.3	Anforderungen an die Kühlschmierstoffe	84
2.6.4	Prozessanforderungen	85
2.6.5	Anforderungen und Handling	87
2.6.5.1	Betriebssicherheit und physiologische Verträglichkeit	87
2.6.5.2	Aufbereitung und KSS-Zuführtechniken	87
2.7	Vertikal-Innenrundhonmaschinen	95
2.7.1	Honleisten-Zustellsysteme	95
2.7.1.1	Hydraulische Zustellung (kraftschlüssig)	95
2.7.1.2	Mechanische Schrittzustellung (formschlüssig)	96
2.7.1.3	Doppelzustellsysteme	98

2.7.2	Messsysteme an Honmaschinen	98
2.7.2.1	Direkt Messsysteme	100
2.7.2.2	Indirekt Messsysteme	104
2.7.3	Formregelungseinrichtungen	107
2.7.4	Berechnungsverfahren	108
2.7.4.1	Schnittgeschwindigkeit	109
2.7.4.2	Hublänge und Honleistenlänge	112
2.7.4.3	Schnittkräfte	113
2.7.4.4	Anpressdruck	114
2.7.4.5	Oberflächenrauheit	116
2.7.4.6	Bearbeitungszugaben und Honzeiten	118
2.7.4.7	Zerspanungskennwerte	123
2.7.5	Werkstoff- und Bauteilspektrum beim Honen	125
2.7.6	Verfahrensvarianten mit Arbeitsbeispielen	127
2.7.6.1	Honen kleiner Bohrungen	129
2.7.6.2	Microcut Honing-System	132
2.7.6.3	Dornhonen	136
2.7.6.4	Peak-Honen	141
2.7.6.5	Plateau-Honen	142
2.7.6.6	Koaxialhonen	149
2.7.6.7	FMF-Hybridhonverfahren: Honen-Fluidstrahlen- Microfinishes	151
2.7.6.8	LH-Hybridhonverfahren: Laserhonen	155
2.7.6.9	Positionshonen am Beispiel der Zylinderbohrung	158
2.7.6.10	Formhonen am Beispiel Zylinderlaufbahn eines Verbrennungsmotors	160
2.7.6.11	Nanotechnologie für Kolbenlaufbahnen	164
2.7.6.12	Honen mit Entgraten	169
2.7.7	Messverfahren, Messzeitpunkt, Maschinenbeispiel, Verfahrensbeispiel, Werkstückbeispiel (Moos, Klein 2022)	171
2.7.7.1	Messverfahren	171
2.7.7.1.1	Lehren mittels Fallkalibern	172
2.7.7.1.2	Messen mittels pneumatischer Staudruckmessung	172
2.7.7.2	Messzeitpunkt	174
2.7.7.2.1	In-Prozess-Messung	174
2.7.7.2.2	Post-Prozess-Messung	175
2.7.7.3	Maschinenbeispiel: Portalhonmaschine mit dreiachsigem CNC-Positioniersystem	182
2.7.7.4	Verfahrensbeispiel: Paarungshonen	184
2.7.7.5	Werkstückbeispiel: Führungshülse für Voice- Coil-Motoren in der Beatmungstechnik	186

3	Langhubhonen auf Bearbeitungszentren	189
3.1	Honen mit dem integrierten Bearbeitungszentrum (z.B. nach MAG oder Grob)	191
3.2	Honkomponenten integrierbar für BAZ oder Dreh- und Fräszentren (DIAHON-System)	195
3.2.1	coolEX® (DIAHON) Honwerkzeug – Technologie	195
3.2.2	Neue koaxiale Grob- und Feinbearbeitung – Reiben und Honen im Kombiwerkzeug	196
3.2.3	Hydraulikbauteil	201
4	Langhubhonen mit Roboter – Roboterhonen	205
4.1	Flexibles robotergeführtes Dornhonen am Beispiel Verdichter ..	206
4.2	Flexibles robotergeführtes Honen mit zustellbarem Honwerkzeug	215
5	Qualitätsmerkmale beim Langhubhonen	219
5.1	Grobgestaltabweichungen mit Messtechnik	220
5.2	Feingestaltabweichung	225
5.2.1	Rauheit	225
5.2.1.1	R_a – arithmetischer Mittlerrauwert	225
5.2.1.2	R_{max} – maximale Rautiefe DIN 4748: 1990	226
5.2.1.3	R_z – gemittelte Rautiefe (nach DIN EN ISO 4287)	227
5.2.1.4	R_{3z} – Grundrautiefe (keine Normkenngröße)	228
5.2.1.5	R_{mr} – Materialanteil des Profils	229
5.2.1.6	Kenngrößen zur Beurteilung von plateauartigen Oberflächen (nach DIN EN ISO 13 565)	231
5.2.1.7	R_k – Kernrautiefe	232
5.2.2	Welligkeit	235
6	Oberflächenmesstechnik zur Kontur- und Rauheitsmessung	237
6.1	Berührende Messsysteme – Taktile Messtechnik	238
6.2	Berührungslose Messsysteme – Optische Messtechnik	239
6.2.1	Konfokale Messtechnik	240
6.2.2	Fokusvariation	242
6.2.3	Weißlichtinterferometrie	243
6.2.4	3D-Charakterisierung DIN EN ISO 25178	244
6.3	Optische Qualitätsprüfung von Honleisten	250
6.4	Optische Oberflächenmessung von gehonten Zylinderlauflächen	255

7	Grundlagenanalyse – neue Anwendung und Werkzeuge der Kraft-Weg gebundenen Zustellung	259
7.1	Abtragsvorgänge beim Honen und Superfinishen	259
7.2	Oberflächenanalytik in der Endbearbeitung	264
7.3	Kraftdynamik in der Endbearbeitung	267
7.4	Industrielle Anwendung der Prozesse	268
7.5	Kombinierte Technologie: Sensitiv-adaptives Honen und Superfinishen	273
8	Kurzhubhonen	275
8.1	Kurzhubhonvarianten nach Bearbeitungsgeometrien und spezifischen Bauteilen	276
8.2	Verfahren	278
8.2.1	Verfahrensmerkmale	278
8.2.2	Berechnungsgrundlagen	279
8.2.3	Verfahrensvarianten	280
8.2.3.1	Oszillationsfinishen als Einstechverfahren mit Beispielen	281
8.2.3.2	Oszillationsfinishen als Durchlauf- und Längsbearbeitung	282
8.2.3.3	Rotationsfinishen als Einstechverfahren für Plan- und sphärische Flächen	283
8.3	Maschinen	285
8.3.1	Zustellsysteme, Werkzeuge mit Schneidmittel	285
8.3.2	Kühlschmierstoff (KSS) mit Aufbereitung	286
8.3.3	Rotationsfinish-Maschine für Planflächen als Vertikalbearbeitung	287
8.3.4	Modulare Rotations-Finishmaschine auch als Feinstbearbeitungszentrum	289
8.3.5	Finishmaschine mit Band-Technologie	290
8.3.6	Robotergestützte Superfinish-Bearbeitung	292
8.4	Bearbeitungsbeispiele	293
8.5	Kurzhubhon-Anbaugeräte	296
9	Verzahnungshonen	297
9.1	Einleitung	297
9.2	Geschichtliches	298
9.3	Verfahrensvarianten	299

9.4	Qualitätsmerkmale	302
9.5	Wirtschaftlichkeit	303
9.6	Leistungshonmaschine für Verzahnungen	304
9.7	Zusammenfassung und Teilespektrum	306
Index	309



Videoübersicht		
Video Nr.	Was wird gezeigt?	Abschnitt/Seite
Video 1	microcut Honing-System	2.7.6.2/132
Video 2	KADIA X line Fertigungszelle Teaser V3	2.7.7.3/184
Video 3	KADIA R-line Erklärfilm	2.7.7.4/185
Video 4	DIAHON Simulation der Luftmessung und Live-Darstellung mit Cool EX LM Werkzeug	3.2.1/196
Video 5	DIAHON Fdream Honen und Reiben	3.2.2/198
Video 6	DIAHON, automatische Verstellung mittels Drehbewegung der Maschinenspindel, mikrometergenaue Durchmesseranpassung und Verschleißkompensation für FDhone- und coolEXact-Werkzeuge, Werkzeugverstellung am Beispiel in einer Grob	3.2.2/199
Video 7	Roboterhonen	4.1/212

Geleitwort

Erstmals vor einem knappen Jahrhundert in der hochautomatisierten Serienfertigung von Automobilen eingesetzt, wurden Honprozesse seitdem stetig weiterentwickelt und von immer wieder neuen Fertigungsaufgaben herausgefordert. So dient das Honen längst nicht mehr nur der Fein- und Feinstbearbeitung rotationssymmetrischer Bohrungen, sondern der Fertigung nahezu beliebiger, mitunter komplexer Werkstückkonturen mit höchster Präzision und maximaler Prozesssicherheit. Angesichts stetig steigender Anforderungen an Form-, Maß- und Lagenauigkeit, Oberflächenqualität und Randzonenintegrität funktionaler Bauteile, die es gilt mit maximaler Reproduzierbarkeit herzustellen, hat sich das Honen als leistungsstarkes und konkurrenzfähiges Verfahren in der Feinbearbeitung unter Beweis gestellt.

Ausgezeichnet durch rhombische Materialplateaus, unterteilt durch sich kreuzende Bearbeitungsspuren, verfügen gehonte Oberflächen über exzellente Schmierfilmhaltefähigkeiten und somit hervorragende tribologische Eigenschaften. Auch begünstigen die hohen Materialanteile gehonter Oberflächen ein sehr gutes Eilauf- und Verschleißverhalten der Bauteile. Die anforderungsgerechte Herstellung der Oberflächentopografien erfolgt hierbei auf Grundlage der Auswahl der Bearbeitungsmaschine, der Art und des Aufbaus der Honwerkzeuge, der Prozesskinematik sowie der Bereitstellung geeigneter Prozessparameter. Anhand zahlreicher Beispiele aus der industriellen Praxis stellt das vorliegende Fachbuch die Systematik des Honens und die Einflussmöglichkeiten des Anwenders zielgerichtet, umfassend und anschaulich dar.

In der vorliegenden überarbeiteten zweiten Auflage des Fachbuchs werden die fundamentalen Abtrennmechanismen sowie die Oberflächenanalytik näher erläutert, wobei insbesondere die Oberflächenmesstechnik mit Schwerpunkt auf berührungslose Messsysteme anschaulich aufbereitet ist. Darüber hinaus greift die zweite Auflage des Fachbuchs Innovationen im Bereich der modernen Hontechnologie auf. Neben dem Roboterhonen, entwickelt in Kooperation mit dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb der Technischen Universität Berlin, werden auch neuartige Anwendungen wie Voice-Coil-Motoren für die Beatmungs-

technik adressiert. Weiterentwickelte Kombinationswerkzeuge für koaxiales Reiben und Honen, Feinbearbeitungstechniken für Kleinstbohrungen sowie Einsatzbedingungen der Kühlshmierung und deren Einflüsse auf das Honen runden das Inhaltsspektrum des Fachbuchs ab. Das Fachbuch zum Honen avanciert mit der erweiterten zweiten Auflage zu einem umfassenden und unverzichtbaren Nachschlagewerk mit ausgeprägtem Anwendungsbezug für die industrielle Praxis und die universitäre Lehre.

Berlin, 4. Mai 2022

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

■ 1.1 Geschichtliches

Das ständige Bestreben der Menschheit war seit eh und je die Qualität in den verschiedenen technischen Bereichen weiterzuentwickeln. Als Präzedenzfall dafür kann sicher die Entwicklung der Bohrungen über Jahrtausende bis zum heutigen Entwicklungsstand gesehen werden. Explizit an einigen Beispielen wird im Folgenden die Entwicklungsgeschichte der Bohrungsherstellung aufgezeigt.

Eine runde Scheibe als Fortbewegungsmittel, mit einer mittigen Ausnehmung, die Faszination Rad, muss auch schon in frühen Zeiten geboren worden sein. Im deutschen Südwesten, im Olzreuter Ried bei Bad Schussenried (Landkreis Biberach) haben Archäologen erneut Holzstücke gefunden, die einer kleinen Gruppe weltweit ältester Räder zuzuordnen sind (Stand September 2015). Bereits 2009 wurden hier mehrere große Scheibenräder aus der Zeit um 2900 v. Chr. bei Grabungen entdeckt. Bei den jetzt ausgegrabenen Gegenständen handelt es sich wohl um ca. 5000 Jahre alte Modellräder mit einem Durchmesser von ca. 7 - 10 Zentimetern (Bild 1.1).



Bild 1.1 Faszination Rad um 2900 v. Chr.

Zwei grundlegend verschiedene Auslegungen konnten festgestellt werden: Räder mit feststehender Achse, wie sie die frühen Hochkulturen des Orients nutzten, und Räder mit rotierender Achse, wie sie in den prähistorischen Pfahlbauten-Siedlungen rund um die Alpen nachgewiesen und später in Westeuropa weiterentwickelt wurden. In der Steinzeitsiedlung von Olzreute begegnen sich beide Erfindungen. Die Modellräder, mit den kleinen Durchmessern könnten als Spielzeug, technisches Demonstrationsobjekt oder gar als ritueller Gegenstand verwendet worden sein.

In Bild 1.2 ist das Bohren mit dem Fiedelbogen um ca. 4000 v. Chr. dargestellt. Den eigentlichen Abtrag bewirkten „Abrasivstoffe“ wie Sand- und Schmirgelkörner, die – an der Bohrstelle zugeführt – vom „Bohrer“, einem hohlen Knochen, auf das Werkstück gedrückt und mithilfe des Fiedelantriebs hin und her bewegt wurden. Die „Vorschubkraft“ wurde von dem angekoppelten Stein eingeleitet und so das Loch in das Werkstück gerieben (Mommerts 1981).

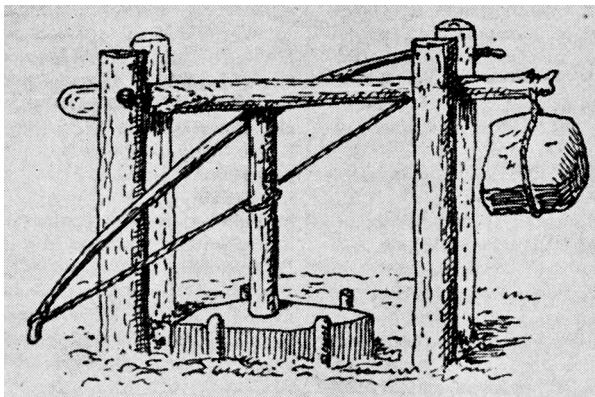


Bild 1.2 Bohrapparat mit Fiedelantrieb (Europa) um 4000 v. Chr. (Foto: Deutsches Museum)

Bereits eine Analogie zur heutigen Definition des Feinbearbeitungsverfahrens Honen kann man in den Handskizzen von Leonardo da Vinci, datiert um das Jahr 1500, erkennen (Bild 1.3). Die Einheit wird beschrieben als Maschine zum Ausschleifen von Hohlzylindern. Bei seiner Konzeption wird der Zylinder stehend auf dem Maschinentisch mit zwei Klemmbacken radial gespannt. Ein bohrungsfüllendes, sogenanntes Schmirgelholz, mit schrägen Nuten zur Öl- und Schmirgelzufuhr, sowie zum Abtransport des Materialabtrags, wird auf- und abwärts bewegt. Die Einleitung der Hubbewegung erfolgt manuell über ein großes vertikal angeordnetes Antriebsrad. Die Bewegung wird über das Getriebesystem mit dem außenverzahnten Rad über ein entsprechendes Innengewinde auf die Gewindespindel mit dem gekoppelten Schmirgelholz übertragen. Durch den Drehrichtungswechsel des Antriebsrades kann der Auf- und Abwärtshub bewirkt werden. Zweifellos sind

bereits schon zu dieser Zeit einige Grundaspekte zum heutigen high Technology Honen geboren worden. So wurde schon damals den Vorteilen des bohrungsfüllenden Werkzeugs, der Hubbewegung mithilfe der Gewindespindel und den feinen Abtragsmöglichkeiten am Bohrungsumfang mit undefinierter Schneide Beachtung geschenkt. Erst viele hundert Jahre später wurden diese Basismerkmale ergänzt mit der kontinuierlichen rotatorischen Bewegung und der radialen Schneidstoff-Zustellung mit gebundenen Korn-Abrasivstoffen (Flores 1992).

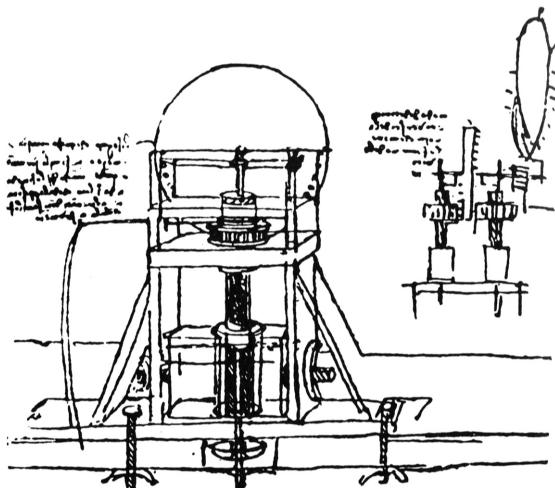


Bild 1.3 Handskizze von Leonardo da Vinci um 1500 n. Chr.: Maschine zum Ausschleifen von Hohlzylindern. Rechts im Bild ist noch eine 2-Spindel-Maschine angedeutet.

Bei der heutigen Bohrungsherstellung ist nicht nur die eigentliche Funktion der Bohrung an sich vordergründig, sondern auch die Qualität und Wirtschaftlichkeit. So sind zum Beispiel wichtige Herstellungskriterien Reibungsreduzierungen, die einhergehen mit Energieeinsparungen und zum Beispiel CO₂-Reduzierungen oder Lärminderungen durch hochgenaue Funktionsteile unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Aspekte. Für derartige Fertigungsaufgaben werden neuartige Honetechniken eingesetzt, wie sie exemplarisch in Bild 1.4 aufgezeigt werden. So die pneumatischen In-Prozess-Messungen zur Maß- und Formregelung (Bild 1.4 D) in Verbindung mit elektromechanischen Honleisten-Schrittzustellungen und Kraftsensorik (Bild 1.4 C), welche heute Maß- und Formgenauigkeiten um 1 µm in der Großserienfertigung möglich machen. Automatische Werkzeugwechsler (Bild 1.4 A) und digitale Honsteuerungen (Bild 1.4 B) sind ebenfalls Bestandteile von modernen Honanlagen.

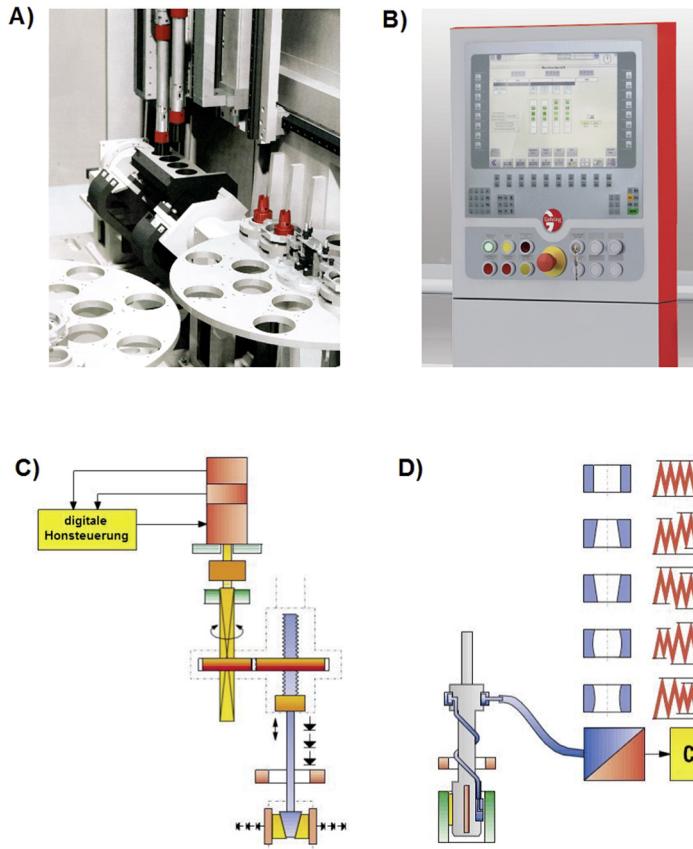


Bild 1.4 Hontechnik um 2019 (nach Gehring) Endbearbeitung von Bohrungen durch Honen
 A) Modulares Honzentrum mit automatischem Werkzeugwechsel-System
 B) Digitale Honsteuerung mit bedienerfreundlichen dezentralen Stationspulten
 C) Elektromechanische Schrittzustellung mit Kraftsensorik
 D) Pneumatische In-Prozess-Messung mit Maß- und Formregelung

■ 1.2 Einleitung und Übersicht der Honverfahren

Das Langhub-Honverfahren entwickelte sich aufgrund des Strebens, in der Metallbearbeitung Bohrungen form- und maßgenau und mit funktionsgerechter Oberfläche herstellen zu können. Schon um das Jahr 1910 wurden in Deutschland zum ersten Mal Bohrungen durch Honen bearbeitet. Dabei wurde als Honwerkzeug ein längsgeteilter, mit Schmiegelleinwand belegter Holzzyylinder verwendet, dessen Hälften mit Federn an die Bohrungswand angedrückt wurden. Das Werkzeug

wurde von Hand gedreht und gleichzeitig in der Bohrung hin- und hergeführt. Später wurde daraus ein Aluminiumkolben, den man auf einer Ständerbohrmaschine auf und ab bewegte und gleichzeitig umlaufen ließ. Das Bearbeitungsverfahren wurde damals Ziehschleifen genannt.

Industriell wurde das Honverfahren zunehmend zu Beginn des 20. Jahrhunderts eingesetzt. Schrittmacher dieser Erfindung war sicher unter anderem die funktional notwendige Qualität von Kolbenlaufbahnen bei der anlaufenden Produktion von Verbrennungsmotoren in der industriellen Fertigung. Henry Ford ließ 1923 in Detroit bereits etwa 1000 Kraftwagen pro Tag produzieren. Er war der erste, der das Honverfahren in der Massenfertigung einsetzte. Im Jahre 1926 fand dieses Bearbeitungsverfahren auch in europäischen Automobilfirmen Eingang. Dabei wurde das Wort „Honing“, das Fein-Abschleifen bedeutet, in „Honen“ eingedeutscht.

Ein anderer Ursprung ergab sich bei der Entwicklung des Kurzhubhonens (Superfinish-Verfahren). In den 1930er-Jahren wurde beim Bahntransport (Bild 1.5) neuer Kraftfahrzeuge in den USA durch auftretende Stöße und Erschütterungen an den geschliffen bearbeiteten Laufbahnen der Wälzläger immer wieder Radlagerschäden in Form von Mulden und Eindrücken (Setzmarkierung) festgestellt, die von den Wälzkörpern herrührten (Bild 1.6).

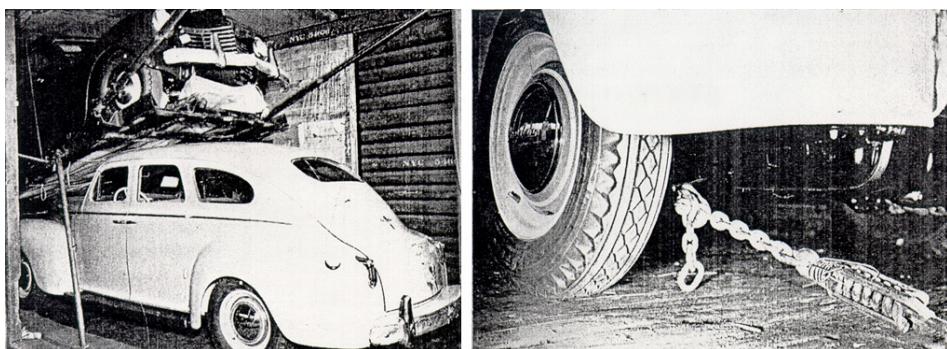


Bild 1.5 Kalifornien, USA 1934 (nach Thielenhaus)

Bei Autos, die von Detroit mit der Bahn geliefert wurden, erzeugten die Radlager nach dem Abladen beim Fahren klickende Geräusche.

Bei Chrysler (USA) wurden diese Schäden zum ersten Mal richtig erkannt und durch die Erfindung des Superfinish-Verfahrens beseitigt. Durch das Superfinishing hatte man die „Weichhaut“ entfernt, eine amorphe Schicht, welche sich beim Schleifen aufgrund der hohen Zerspanungstemperaturen und Arbeitsdrücken auf dem Bauteil bildete.

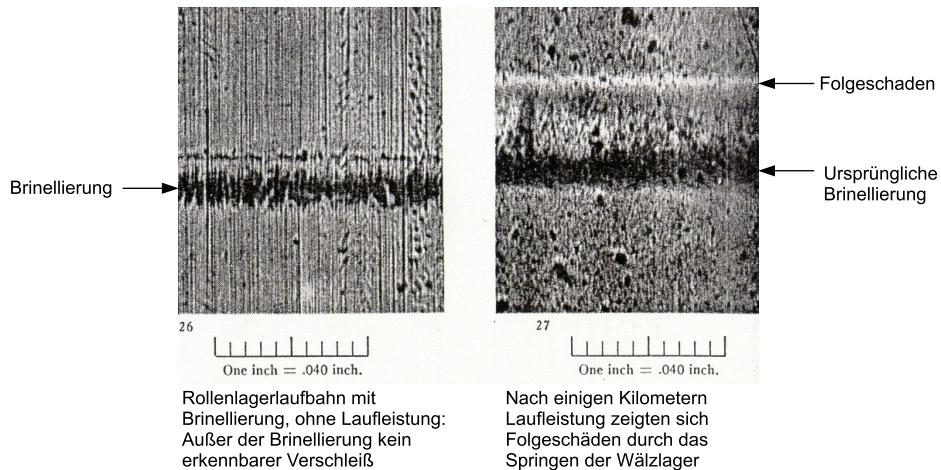


Bild 1.6 Beschädigungen an der Lagerlaufbahn vom Bahntransport (nach Thielenhaus)

Daraus zog man den Schluss, dass die bis dahin angewendeten Fertigungsverfahren um ein neues Verfahren ergänzt werden mussten, das unter geringerer Wärmeentwicklung und bei geringeren Arbeitsdrücken abläuft.

Das Wort „Superfinish“, das für dieses Verfahren damals und in der Praxis heute noch verwendet wird, bedeutet dem Sinne nach die „allerletzte“ Bearbeitungsstufe. 1940 berichtet der Chrysler Mitarbeiter D. A. Wallace darüber in seiner ersten Veröffentlichung. Damals stellte Chrysler für seinen Eigenbedarf bereits Superfinishmaschinen nach dem heutigen Bewegungsprinzip her. Später waren es mehrere Firmen in den USA, in Deutschland und in der UdSSR, die auf diesem Gebiet Entwicklung betrieben und Superfinishgeräte und -maschinen herstellten und auf den Markt brachten.

Nach DIN 8589-14 ist Honen das 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, sodass die bearbeitete Oberfläche auch definiert überkreuzende Spuren aufweist. Weitere Begriffsbestimmungen enthalten die Normen DIN 8580, 8635, DIN ISO 525 und DIN ISO 603-10.

Die Bearbeitung von Werkstücken mit den unterschiedlichsten Formen, Abmessungen und Oberflächenmodifikationen durch Honen ist in den vergangen 20 Jahren aufgrund seiner Anpassungsfähigkeit beachtlich ausgedehnt worden. So sind neben den klassischen Honverfahren und den vielfältigen Modifikationen, Verfahrenskombinationen wie die Hybridbearbeitung „Laserhonen“ und „Honen mit Fluidstrahlen“ seit Jahren in der Großserienfertigung beim Langhuhonen im Einsatz. Außer den Langhuhonvarianten wurden auch verschiedene andere Honver-

fahren weiterentwickelt. Die in der Praxis geläufige Unterteilung der Honverfahren (Bild 1.7) ergibt sich aus der Kinematik des Bewegungsvorgangs. Je nach der Hubumkehrlänge von Werkzeug bzw. Werkstück unterscheidet man zwischen Langhubhonen (Kap. 2), früher Ziehschleifen, und Kurzhubhonen (Kap. 8), oft auch Superfinish (ursprünglich von Chrysler) oder einfach Finishen, Microfinishes oder Schwingsschleifen genannt. Nach Form und Lage der Bearbeitungsstelle am Werkstück und der jeweiligen Maschinenkonfiguration wird weiter unterteilt in Innenhonen, Außenhonen und dem Sonderverfahren Verzahnungshonen (Kap. 9).

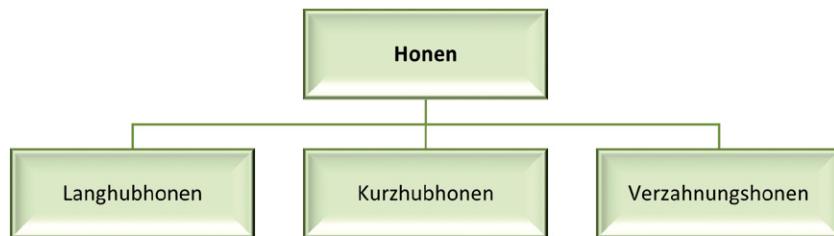


Bild 1.7 Übersicht der Honverfahren (nach iht-Klink)

Literatur

Flores, Gerhard: Grundlagen und Anwendungen des Honens; Vulkan-Verlag, Essen 1992

2

Langhubhonen

Beim Langhubhonen wird wie beim Honen allgemein mit gebundenen Abrasivstoffen, den Honleisten, Werkstoff von der Werkstückoberfläche fein abgespant. Das Langhubhonen (Bild 2.1) ist die meist angewandte Honvariante und wird hauptsächlich für Innenrundhonaufgaben eingesetzt. Wie der Name schon aussagt, arbeitet man im Vergleich zum Kurzhubhonen mit relativ langen Hüben. Die Schnittgeschwindigkeiten sind im Vergleich zu anderen spanenden Verfahren relativ niedrig, liegen überwiegend im Bereich von 30 bis 100 m/min und bewirken eine verhältnismäßig geringe Erwärmung. Der Kühlsmierstoff sorgt dabei für die notwendige Schmierung, Kühlung und Spülung. Wie mit keinem anderen Endbearbeitungsverfahren ist beim Langhubhonen die Oberfläche modifizierbar und funktionell anpassbar. Durch die Möglichkeiten von geringsten Abtragsraten pro Hub sind in Verbindung mit Honmesseinrichtungen engste Maßtoleranzen gesichert erreichbar. Das bohrungsfüllende Honwerkzeug mit der großflächigen Schneidkorneinwirkung der Honbeläge bewirkt eine schnelle Verbesserung der Formfehler. Die verfahrensspezifische gegenseitige Orientierung von Werkzeug und Werkstück bringt eine gleichachsige Bearbeitung mit sich. So ist mit geringstem Materialabtrag bei Beibehaltung der Bohrungslage eine Verbesserung der Makrogeometrie bei einer funktionsgerechten Mikrogeometrie möglich. Durch relativ einfache Modifizierung der herkömmlichen Hontechnik sind neben den üblichen Maß-, Form- und Oberflächenverbesserungen auch Winkel und Planschlagkorrekturen, wie z.B. bei Pleuelstangen, Getrieberädern und Steuerschiebern, in engen Toleranzgrenzen möglich. Durch weitere Einengung der sonst üblichen Freiheitsgrade können Lagekorrekturen von Bohrungen bewirkt werden; zum Beispiel bei der Achsabstandskorrektur von 2-Takt-Pleuelstangen. Auch das Positionshonen in Verbindung mit Schrupphonen stellt eine weitere Verfahrensvariante dar, wie sie beispielsweise bei Kolbenlaufbahnen von Motorblöcken, um Feindrehen zu ersetzen, in den letzten Jahren in der Großserie umgesetzt wurde.

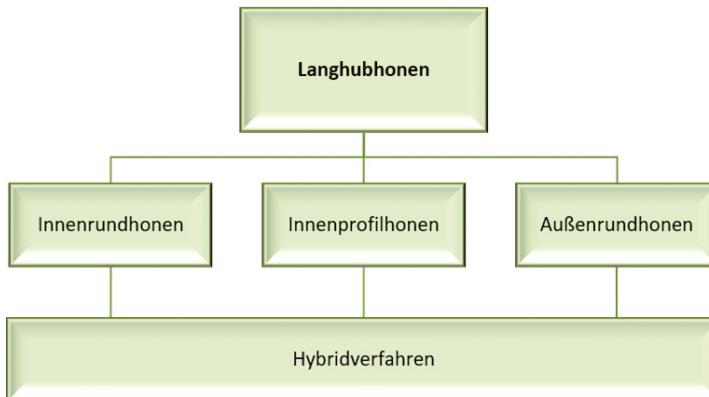


Bild 2.1 Übersicht Langhubhonvarianten (nach iht-Klink 2021)

Die vorteilhafte Ausbildung von Druckeigenspannungen in der Randzone durch Honen wurde zu einem weiteren Qualitätsmerkmal, vor allem bei kleinen Bohrungen ($< 3 \text{ mm } \varnothing$) in der Kraftstoffeinspritztechnik (Klink, Flores 2003).

Je nach Funktionsprofil sind die Oberflächenarten geestaltbar bis zu einer Oberflächengüte von ca. $R_z = 0,3 \mu\text{m}$. Bei den hochgenauen Einspritzpumpenteilen für Benzin- und Dieseleinspritzsystemen liegen in vollautomatischen Großserienanlagen, bei Taktzeiten unter 20 s, die Zylinderformqualitäten und Maßtoleranzen bereits bei $< 0,5 \mu\text{m}$ und $< 1 \mu\text{m}$.

■ 2.1 Langhubhonvarianten mit Bauteilcharakteristika

2.1.1 Innenrundhonen

Innenrundhonen hat von den Langhub-Honverfahren das breiteste und größte Anwendungsspektrum und bildet somit auch die umfangreichsten Grundlagen und aussagekräftigsten Erkenntnisse für die entsprechenden Ausführungen in diesem Buch. Es ist das Honen i. d. R. von kreiszylindrischen Innenflächen und kann für vollflächige und unterbrochene Durchgangsbohrungen, auseinanderliegende Bohrungen, Bohrungen mit Ringnuten und Stufenbohrungen mit gleicher Bohrungsachse eingesetzt werden (Bild 2.2).

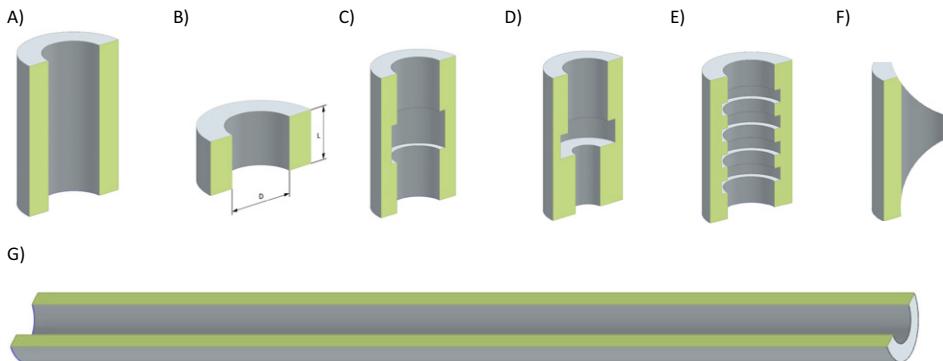


Bild 2.2 Honbare runde Durchgangsbohrungen

- A) vollflächige Bohrung
- B) kurze Bohrung mit $L/D < 1$
- C) auseinanderliegende kurze Bohrungen mit gleicher Bohrungssachse
- D) Stufenbohrung
- E) mehrfach durch Ringnuten unterbrochene Bohrung
- F) Teilbohrung
- G) überlange Bohrungen von $L/D > 10$ bis 100

Bei Sacklochbohrungen (Bild 2.3) sind Sondermaßnahmen erforderlich, um das Qualitätsziel über die ganze Bohrungslänge, insbesondere am Bohrungsgrund und an den Öffnungen der Bohrungswand (Wandungsfenster) zu erreichen. Der nicht mögliche Honleistenüberlauf am Bohrungsgrund wird durch Wirkzeiterhöhung, wie z.B. Kurzhubhonen und/oder Hubverzögerung, sowie durch Schneidflächenvergrößerung in diesem Bereich kompensiert. Zur Qualitätssicherung an großen Wandungsfenstern sind meist Segmentwerkzeuge zur großflächigen Überdeckung notwendig. Die hochharten Schneidstoffe, wie z.B. Diamanthonleisten, mit ihrer außerordentlich hohen Formhaltigkeit sind ein weiterer wesentlicher Faktor, die Qualität auch bei Sacklochbohrungen über große Stückzahlen hinweg konstant zu sichern.

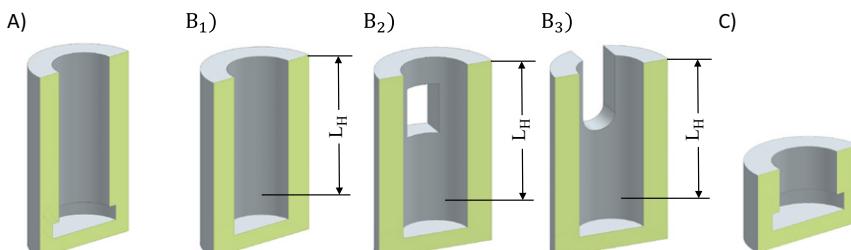


Bild 2.3 Honbare runde Sacklochbohrungen:

- A) mit Freistich am Bohrungsende
- B₁) ohne Freistich, jedoch mit vorgegebener Bearbeitungslänge LH und Qualitätsvorgabe
- B₂) wie B₁, jedoch mit Wandungsfenster
- B₃) wie B₁, jedoch mit offener Längsnut
- C) kurze Sacklochbohrung mit $L/D < 1$ und kleinem Freistich

2.1.2 Innenprofilhonen

Innenprofilhonen ist ein eher kleiner, aber technisch anspruchsvoller Anwendungsbereich im Honeteilespektrum. Man spricht von Profil- oder neuerdings von Formhonen, wenn es um nicht zylindrische Honbearbeitung geht. So werden nach dem Honprinzip beispielsweise konische, ovale, trochoidförmige oder auch definierte Negativformen für Formvorhaltungen bearbeitet. Auch verschiedene segmentartige und tieferliegende Flächen, wie z. B. Axial- oder auch Drallnuten, können gehont werden und gehören zu diesem Spektrum (Bild 2.4).

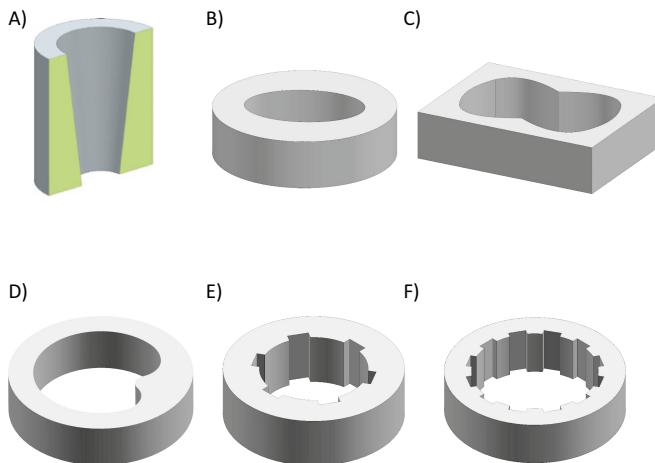


Bild 2.4 Honbare profilierte Bohrungen:

- A) konische Bohrungen
- B) unrunde Bohrung
- C) Trochoidale z. B. für Wankelmotor
- D) Formhonen, Bearbeitung mit Vorhaltekontur z. B. für Zylinderkurbelgehäuse
- E) Bohrung mit Mehrkantprofil
- F) Bohrung mit Zügen (z. B. Drallnuten in Waffenläufen)

2.1.3 Außenrundhonen

Außenrundhonen (Bild 2.5) ist Honen von zylindrischen Außenflächen, wie z. B. Antriebswellen und Pinolen, im Wesentlichen zur Verbesserung von Maß, Rundheit und Welligkeit sowie der Erzeugung der funktionell notwendigen Oberfläche. Es ist nach dem Bearbeitungsvorgang eine Umkehrung des Innenhones. Abweichend vom Innenhonen ist dabei die Anordnung von Werkzeug und Werkstück. So wird im Gegensatz zum Innenhonen nicht das Werkzeug von der Spindel aufgenommen, sondern das Werkstück, welches auch entsprechend die Hub- und Drehbewegung durchführt. Das Außenhonwerkzeug mit mechanischem oder hyd-