Rundheit ⊙ ≤ 6 µm
Oberfläche = 1 – 3 µm $R_z$
Taktzeit ≤ 40 s.

**Auslegung auf drei Stufen-Honprozess:**

Wirtschaftliche Honzugabe:

$\Delta d_{wz} = 2 \cdot (R_z + t_V) = 2 \cdot (14+12) = 0{,}052$ mm

+ Ø-Toleranz (30 µm) vor dem Honen = 0,052... 0,082 mm.

Ausgangspunkt der Honstufen-Auslegung ist die Fertighonstufe mit welcher zielorientiert primär die Endoberfläche, in diesem Fall von 1 bis 3 µm $R_z$, erreicht werden muss. Aus der gemittelten Oberflächenvorgabe von 2 µm $R_z$ ergibt sich im Ablesebeispiel in Abbildung 97 A die Diamanthonleiste D20 mit einem gesicherten Materialabtrag in Abbildung 97 B von 15 µm im Durchmesser. Die Zwischenhonleiste muss wiederum der Fertighonleiste die funktionell gesicherten Vorgaben für die wirtschaftliche Bearbeitung liefern. Das heißt, die D20-Leisten bewirken einen Abtrag im Radius von 7,5 µm, also darf die vorausgehende Zwischenhonleiste keine rauere Oberfläche erzeugen. In Abbildung 97 A ergibt sich bei der Vorgabe von 3 bis 6 µm $R_z$ (gemittelt 5 µm $R_z$) eine Diamantleiste von D64. Die Vorhonstufe wird analog der beschriebenen Vorgehensweise ausgelegt. Die Zusammenhänge eines 3-Stufen-Honprozesses sind in Tabelle 16 veranschaulicht.

**Tab 16** Honstufen-Auslegung einer Grauguss-Kolbenlaufbahn aus Tabelle 15 (nach iht-Klink)

| | Honstufen-Auslegung | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Oberfläche Rz [µm] | Diamantleiste | Materialabtrag im Radius/ im Ø [µm] | Taktzeit / Honzeit |
| Stufe 3: Fertighonen | 1–3 | D20 | 7,5/15 | 40/30 s |
| Stufe 2: Zwischen-honen | 3–6 | D64 | 12,5/25 | |
| Stufe 1: Vorhonen | 6–10 | D151 | 20/40 | |
| Vorbearbeitung | 10–14 | feingebohrt | | |

Als Grundregel gilt:
Min. Materialabtrag (im Radius) > Ausgangsoberfläche.

Nicht relevant sind dabei Abweichungen beim Vorhonen auf Grund der Vorbearbeitungstoleranz im Durchmesser.

#### 2.7.4.7 Zerspanungskennwerte

Um eine fundierte Prozessoptimierung vornehmen zu können ist beim Honen die Kennwertermittlung über eine große Anzahl von Bohrungen notwendig. Viel Potenzial ist oft beim Werkzeug zur Schneidbelagoptimierung gegeben. Nicht zielführend ist hier zum Beispiel Abtragswerte oder Verschleißwerte isoliert zu erfassen, sondern die Kenndaten transparent zu bündeln für eine gesamtheitliche Kostenbetrachtung. So kann im Schneidbelag-Vergleich der *G*-Wert, das Verhältnis von abgespantem Werkstoffvolumen zum Volumen des Honbelagverschleißes, der entscheidende wirtschaftliche Faktor für eine Schneidbelag-Spezifikation sein, da mit steigendem *G*-Wert (Tab. 17) analog die Belagkosten pro Bohrung sinken. Für die *G*-Wert-Ermittlung gilt:

$$G = \frac{V_W}{V_S} \tag{11}$$

mit:

$V_W$ abgespantes Werkstoffvolumen

$V_S$ Volumen des Schneidbelagabriebs
(Schneidbelagabmessungen: Breite B, Höhe H, Länge L vgl. auch Abb. 68).

Ein weiterer Vergleichswert zur Prozessoptimierung ist mit dem auf die Schneidfläche bezogenen Zeitspanungsvolumen (Tab. 17) gegeben.

Für das bezogene Zeitspanungsvolumen gilt:

$$V'_W = \frac{V_W}{t \cdot A_S} \quad \left[\frac{\mathrm{mm}^3}{\mathrm{s} \cdot \mathrm{mm}^2}\right] \tag{12}$$

mit:

$t$ die Honzeit

$A_S$ die Schneidbelagfläche.

Voraussetzung für die Vergleichbarkeit der Zerspanungskennwerte sind gleichartige Werkstücke, bei gleichartigen Maschinenkonzepten, Betriebsmitteln sowie denselben Einstellparametern.

**Tab. 17** G- und $V'_w$-Werte für verschiedene Anwendungsfälle (Spur, Stöferle 1980, aktualisiert und ergänzt iht, Klink 2015)

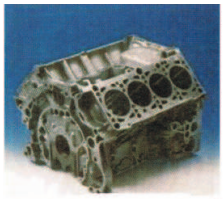
| Werkstück | Kolbenlaufbahnen für ZKG | Zylinderbüchse | Kolbenlaufbahn für ZKG | Zahnrad | Einspritzpumpenelement | Gezogenes Stahlrohr |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vorhonen | Schrupphonen | Positionshonen | Vorhonen | Vorhonen | Vorhonen |
| Werkstoff | GG | GG | GG | gehärteter Stahl (62HRc) | gehärteter Stahl (62HRc) | S355 (EN 10025) alte Bezeichn.: St 52 (DIN17100) |
| Bohrungsabmessung | | | | | | |
| Durchm. [mm] | 80 | 130 | 80 | 45 | 10 | 100 |
| Länge [mm] | 140 | 310 | 140 | 30 | 62 | 1.500 |
| Werkzeugtyp | Achtleisten-Werkzeug | Achtleisten-Werkzeug | Achtleisten-Werkszeug | Sechsleisten-Werkzeug | Einleisten- Werkzeug | Sechsleisten- Werkzeug |
| Schneidbelag [$mm^3$] (B x H x L) | 8 (4 x 2 x 80) | 8 (5 x 3 x 200) | 8 (4 x 3 x 80) | 6 (4 x 3 x 30) | 1 (2 x 2 x 60) | 6 (13 x 13 x 150) |
| Schneidmittel | Diamant | Diamant | Diamant | Bornitrid | Bornitrid | Edelkorund |
| $G = \frac{\Delta V_w}{\Delta V_s} \left[ \frac{mm^3}{mm^3} \right]$ | 3.000 | 13.000 | 11.500 | 2.300 | 1.700 | 10 bis 18 |
| Honzeit $t$ [s] | 30 | 60 | 30 | 40 | 20 | 240 |
| $V'_w = \frac{\Delta V_w}{t \cdot A_s} \left[ \frac{mm^3}{s \cdot mm^2} \right]$ | 0,017 | 0,07 | 0,15 | 0,02 | 0,02 | 0,02 |

### 2.7.5 Werkstoff- und Bauteilspektrum beim Honen

Gehont werden können nahezu alle technisch genutzten Werkstoffe. Dies ist begründet durch die Möglichkeit der sehr flexiblen Anpassung von Schneidleisten- und Kühlschmierstoff-Spezifikationen an das zu bearbeitende Material. Dabei lässt sich heute das gehonte Werkstoffspektrum in etwa wie folgt aufgliedern:

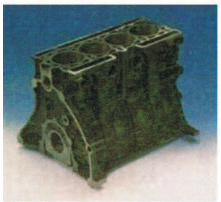
- Grauguss 40 %
- Stahl, gehärtet 30 %
- Stahl, weich 10 %
- Aluminium-Legierungen 10 %
- Sinterwerkstoffe, Buntmetalle, Titanlegierungen
- sonstige 10 %.

Die Werkstoffe kommen vor allem zur Anwendung im Kraftfahrzeugbau, in der Hydraulik- und Pneumatikindustrie, im Werkzeug- und Werkzeugmaschinenbau, in der Kältemaschinenindustrie, im Bereich der Feinwerktechnik und Mechatronik, im Elektromaschinenbereich, bei optischen Komponenten, bei der Medizintechnik und in der Luftfahrt. Beim Anwendungsschwerpunkt Kraftfahrzeugbau wiederum ist das Zylinderkurbelgehäuse der Schrittmacher bei der Werkstoffentwicklung. Allein für die Kolbenlaufbahn sind je nach Motorkonzept zahlreiche neuartige Werkstoffe in den vergangenen Jahren zur Serienreife gebracht worden, so zum Beispiel neue GG-, AlSi- und thermische Beschichtungsvarianten. Im gehärteten Bereich liegt der größte Anteil bei den Bauteilen aus der Einspritzpumpenindustrie. Werkstücke aus konventionellen und innovativen Werkstoffen sind exemplarisch in Abbildung 98 und 99 aufgeführt.



**V8-Motorengehäuse mit Werkstoffvarianten der Kolbenlaufbahn**

- Al-Si-Werkstoffe (Klink, Flores, Gehring Firmenschrift)
- Thermische Spritzschichten (Flores, Gehring Firmenschrift)
- Nickeldispersionsschichten, galvanisch (Flores 1992)



**R4-Motorengehäuse mit Werkstoffvarianten**

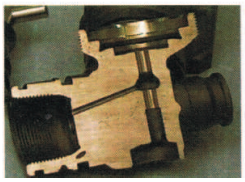
- GG
- GGV (Gusseisen mit Vermikulargraphit)
  (Klink, Flores 2000)

**2-Taktzylinder für Motorsägen**

Al-Grundkörper mit Kolbenlaufbahn-Beschichtung
- Nickeldispersionsschicht (Nikasil, Galnikal)
- Chromschicht (Chromal)
  (Flores 1992)

**Kältemaschinen**

Kühlschrank-Kompressorenbau
- GG



**Einspritzpumpenteile**

- 100Cr6, Härte HRc 62

**Abb. 98** Werkstoff- und Bauteilspektrum beim Honen (iht-Klink)

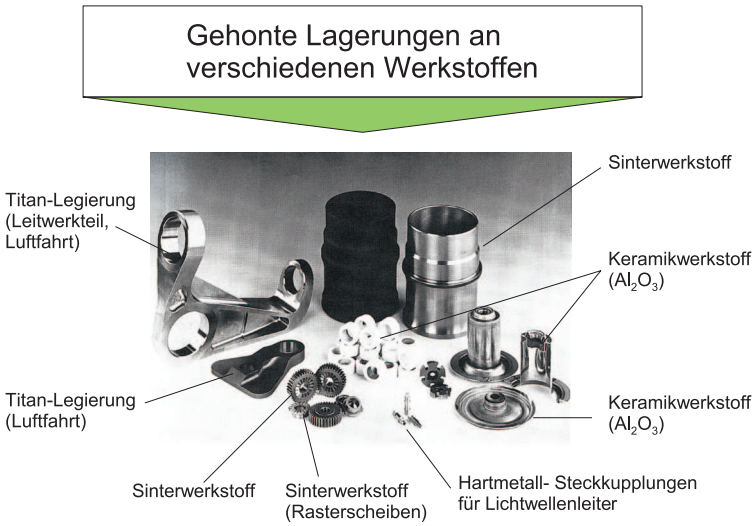



**Abb. 99** Gehonte Lagerungen (nach Gehring und iht-Klink)

### 2.7.6 Verfahrensvarianten mit Arbeitsbeispielen

Die immer höher beanspruchten Bohrungen, im Besonderen mit Gleitfunktion, stehen zwangsläufig im Interesse funktionaler und fertigungstechnischer Entwicklungsprozesse. Die Entwicklung des Honverfahrens orientiert sich an Parametern wie Vorbearbeitung, Werkstoffeigenschaften, Funktionsanforderungen, Fertigungstoleranzen und den Bedingungen und Anforderungen bei der fortwährenden Miniaturisierung vieler Bauteile. Diese Situation führte in den letzten Jahren zu zahlreichen Neuentwicklungen von Verfahrensvarianten, welche die Bereiche Prozessauslegung, Werkzeugdesign, Schneidstoffe und Maschinenbauarten betrafen. Durch die gute Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Zielsetzungen einer Bohrungsbearbeitung ist das Honverfahren ein Prozess mit hoher Innovationskraft und Zukunftsfähigkeit. Im folgenden Abschnitt werden Fortschritte bei miniaturisierten Bauteilen den Kleinstbohrungen, beim Dornhonen, Peak-Honen, bei den bifunktionalen Honsystemen wie Plateauhonen, Spiral-Gleithonen sowie Koaxialhonen und Anwendungen, bei denen das Verfahren mit anderen Prozessen kombiniert wird, den sogenannten Hybridverfahren wie Laserhonen oder Honen mit Fluidstrahlen, vorgestellt.

Wie bei keinem anderen Endbearbeitungsverfahren, kann beim Honen die verfahrensspezifische mikrogeometrische Modifizierbarkeit genutzt werden, wobei die funktionsfähige Lauffläche, welche die tribologischen Anforderungen erfüllt, das Ergebnis der Honbearbeitung am Ende der Wertschöpfungskette ist (Abb. 100). Die Honbearbeitung erfolgt auf Einzelmaschinen, verketteten Einzelmaschinen, Modul-

systemen oder auf Transferhonanlagen. Ausgehend von der feingebohrten Oberfläche sind für die Korrektur von Maßgenauigkeit, Formgestalt und Oberfläche meist 2 bis 3 Honoperationen notwendig. Je nach Vorbearbeitungsqualität, entsprechend der notwendigen Materialzugabe und geforderter Endqualität ist der Honprozess mit unterschiedlichen Komponenten und Betriebsmitteln ausgelegt.

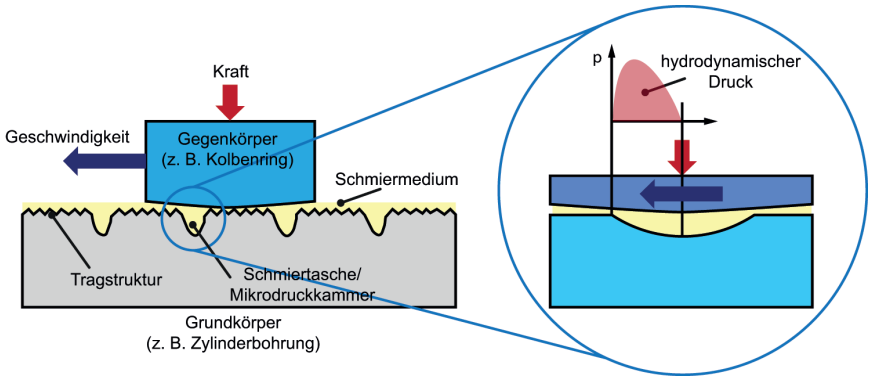



**Abb. 100** Tribologisches System und Aufbau des hydrodynamischen Drucks (Abeln, Flores, Klink 2002) und Abeln (2006)

Als Schrittmacher dienten bei der topographischen Entwicklung sicher schwerpunktmäßig die Kolbenlaufbahnen von Verbrennungsmotoren und beim Genauigkeitshonen (Maß, Form, Oberfläche) die hochgenauen Einspritzpumpenteile und Steuergehäuse.

In Abbildung 101 sind die aktuellen, am meisten in Serie eingeführten Varianten des Honverfahrens aufgezeigt.

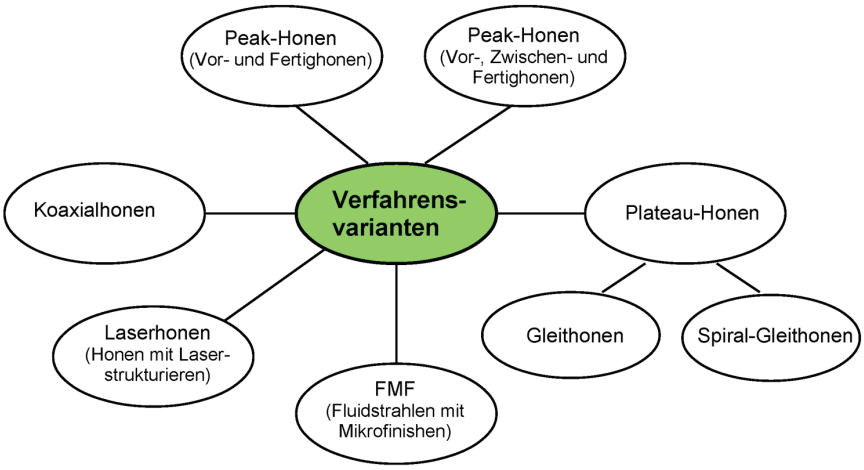



**Abb. 101** In Serie eingeführte Varianten des Honverfahrens (nach iht-Klink 2012)

### 2.7.6.1 Honen kleiner Bohrungen

Die zunehmende konstruktive Miniaturisierung von technologisch hochwertigen Produkten und Bauteilen macht ebenso eine fertigungstechnische Anpassung notwendig. Je nach Funktionsprofil stehen hohe Anforderungen hinsichtlich Maßgenauigkeit, Bohrungsgeometrie und Oberfläche oder die Definition von Toleranzgrenzen für Druckeigenspannungen in der Randzone der gehonten Fläche im Vordergrund. Einzelne Verfahrenskomponenten müssen jeweils auf die unterschiedlichen Funktionsziele der Honbearbeitung abgestimmt werden. Neben der Erfüllung der Qualitätsanforderungen sind wirtschaftliche Werkzeugstandzeiten, auch bei kleinsten Schneidmittelvolumina und stabile Prozesse, die wesentlichen Forderungen der Serienfertigung (Klink, Flores 2003).

#### Aktuelle Anforderung an die Honbearbeitung von Kleinstbohrungen

Mit Honen werden Kleinstbohrungen in den Bereichen Kraftstoffeinspritzung, Kommunikationstechnik, Mechatronik, Mikropneumatik und Feinwerktechnik bearbeitet. Schrittmacher der Entwicklung auf diesem Gebiet sind nach wie vor die vielen anspruchsvollen Bauteile aus dem Bereich der Kraftstoffeinspritztechnik. Neben den geometrischen Genauigkeiten, werden bei den fluidbeanspruchten Hochdruckbohrungen vor allem funktionsgerechte Randzonen von Oberflächen mit hoher Dauerfestigkeit ohne Rissbildungsgefahr benötigt (Abb. 102).

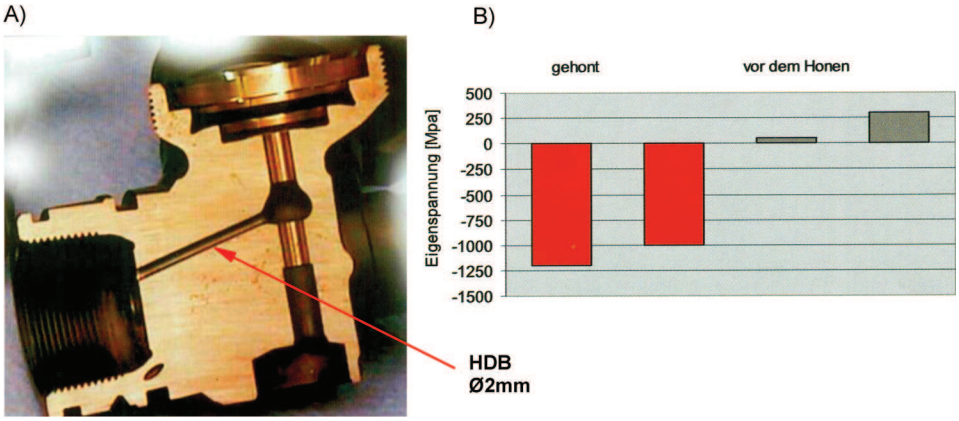



**Abb. 102** A) Hochdruckbauteil mit fluidbeanspruchter Hochdruckbohrung (HDB), B) Eigenspannungen vor und nach dem Honen (Klink, Flores 2003)

### Vergleiche von Verfahren der Endbearbeitung

Für diese miniaturisierten Bearbeitungen im Bereich um und < 2 mm im Durchmesser kommen in der Regel Bearbeitungsverfahren mit undefinierter Schneidengeometrie, d. h. mit gebundenem Diamant- oder CBN-Kristall in Frage. Hartzerspanungsprozesse mit definierter Schneidgeometrie haben sich zumindest in der Breite nicht durchsetzen können, da die Geometrien von etwas längeren Kleinstbohrungen konstruktiv den Einsatz von Hartdrehwerkzeugen ausschließen. Die verbleibenden Verfahren sind daher Honen und Schleifen.

Welches Verfahren wann einzusetzen ist, hängt ab von zahlreichen Details, die im Einzelfall zu beurteilen sind. Jeder Prozess hat seine Anwendungsnischen auf Grund spezifischer Verfahrensmerkmale, die jeweils vorteilhaft genutzt werden können. Mit den Anwendungsprofilen der einzelnen Verfahren (Abb. 103) sind diese Anwendungsnischen dargestellt. Es wird deutlich, dass Honen und Schleifen Prozesse sind, die weniger konkurrieren, sondern sich technologisch und wirtschaftlich sinnvoll ergänzen können, zum Beispiel bei der Steigerung der Maßgenauigkeit. In anderen Fällen können sich die Verfahren jedoch gegenseitig ausschließen. Hohe Druckeigenspannungen zum Beispiel erfordern den Einsatz des Honverfahrens. Auf Grund der Linienberührung und der Kinematik kann Innenrundschleifen hier den Forderungen nicht gerecht werden.