

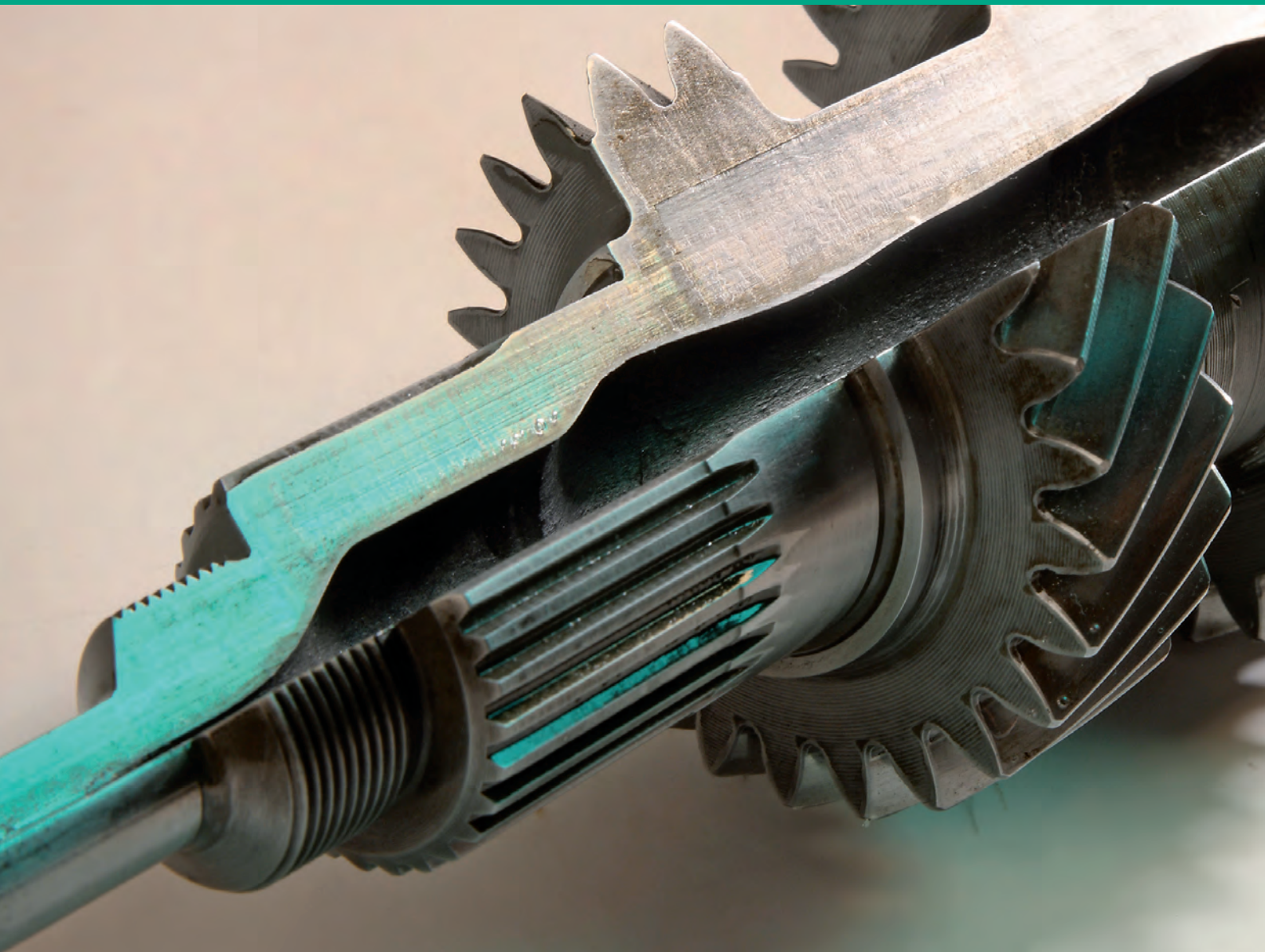


Fraunhofer

IWU

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR WERKZEUGMASCHINEN UND UMFORMTECHNIK IWU

RESSOURCENEFFIZIENZ IM ANTRIEBSSTRANG





KNOW-HOW FÜR DEN ANTRIEBSSTRANG

Systemkompetenz aus einer Hand

Der Antriebsstrang oder – wie es in der Automobilbranche heißt – der »Powertrain« umfasst alle Komponenten für die Drehmomenterzeugung und -übertragung. Er geht damit vom Motor bis zum Rad. Auf dieser Strecke tut sich viel im Automobilbereich: Fahrzeuge müssen leichter werden, damit sie weniger Sprit – und künftig auch weniger Strom – verbrauchen. Die rasch wachsenden Automobilmärkte in China, Indien und Russland bedingen aber in Summe einen immer größeren Energie- und Rohstoffbedarf. Soll der Wohlstand auch künftig gesichert sein, muss die Produktion mit weniger Rohstoffen auskommen. Das Auto bleibt daher auch in Zukunft eine Herausforderung an die Produktionstechnik: Es muss ressourcenschonend gefertigt werden, umweltfreundlich und mit geringem Kraftstoffverbrauch fahren, dabei wenig Schadstoffe in die Luft blasen und möglichst selten eine Wartung benötigen. Wie lassen sich diese Ziele erreichen?

Die Fraunhofer-Gesellschaft hat sich die systematische und institutsübergreifende Entwicklung neuer, effizienter und energiesparender Technologien und Baugruppen für den Antriebsstrang heutiger und zukünftiger Antriebssysteme auf die Fahnen geschrieben. Das Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU koordiniert die Arbeiten einer Gruppe von Fraunhofer-Instituten zu dem unter »Green Powertrain Technologies« zusammengefassten Zukunftsthema.

Systemkompetenz am Fraunhofer IWU

Ein wesentlicher Schwerpunkt unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten liegt sowohl in der Entwicklung und Optimierung von Einzelprozessen als auch von durchgängigen ressourceneffizienten Prozessketten zur Herstellung von Powertrain-Komponenten. Das Fraunhofer IWU deckt den gesamten Bogen von der Simulation zur Optimierung von Prozessen und der Auslegung von Umformwerkzeugen über die Fertigung und den Test der Werkzeuge, die zugehörige Prozesskontrolle zur Qualitätssicherung bis hin zur Fertigung von Prototypen und der Auslegung von Produktionslinien ab. Verfahrenseitig können Unternehmen auf nahezu das ganze Spektrum der umformenden und spanenden Fertigungstechnologien zurückgreifen.

Ein weiteres Ziel ist darüber hinaus die ressourcenschonende Nutzung der Bauteile. Durch Beschichtung und Oberflächenstrukturierung wird ein reibungsarmer Betrieb der Komponenten ermöglicht. Das Fraunhofer IWU fokussiert beispielsweise auf die Untersuchung und Weiterentwicklung von Verfahren, die zur Herstellung tribologisch optimaler Funktionsflächen geeignet sind. Dazu gehören unter anderem das Laserstrukturieren, die elektrochemische Bearbeitung sowie das Band- und Steinfinishen. Eine wesentliche Aufgabe ist dabei die Gestaltung und Bewertung der tribologischen Wirksamkeit und Beständigkeit der so erzeugten Oberflächen.

Unser Leistungsangebot

Prozesskettenentwicklung

- Marktanalyse
- Prozesskettenverkürzung durch Kombination der Near-Net-Shape-Umformung und der spanenden Fertigbearbeitung
- Materialsparende Bauteilgestaltung
- Kosten-Nutzen-Rechnung
- Entwicklung von Fertigungskonzepten
- Grob- und Feinplanung technologischer Verfahren
- Technologische Dimensionierung von Bearbeitungsmaschinen
- Planung und Realisierung von Maschineninvestitionen

Entwicklung und Bewertung von Bearbeitungsprozessen und -strategien

- Marktanalyse
- Machbarkeitsstudie
- Technologieentwicklung und Prozessoptimierung
- Werkzeugkonstruktion und -fertigung
- Erarbeitung von Verfahrenskennwerten
- Erarbeitung optimaler Bearbeitungsstrategien
- Optimierung von Kühlstrategien
- Erhöhung der Prozessstabilität
- Reduzierung der Bearbeitungszeit
- Fertigung von Prototypen und Kleinserien
- Benchmarking von CAD/CAM-Systemen

Gebaute Kurbelwelle

UMFORMENDE FERTIGUNGSVERFAHREN

Innenhochdruck-Umformen (IHU)

Das Innenhochdruck-Umformen hat sich bei der industriellen Serienfertigung von Bauteilen im direkten Automobilzulieferbereich nachhaltig bewährt. Die dabei realisierten Geometrien reichen von Bauteilen für Abgassysteme über Nockenwellen, Achs- und Lenksysteme bis hin zu Motorträgern sowie ganzen Strukturkonzepten. Mit dem Innenhochdruck-Umformen können im Vergleich zu konventionellen Umformtechnologien komplexe Bauteilgeometrien erzeugt und gleichzeitig höhere Umformgrade erreicht werden. Aufgrund der Umformmechanismen verbessern sich zudem die finalen Bauteileigenschaften Genauigkeit, Festigkeit und Steifigkeit.

Beim Innenhochdruck-Umformen wird ein Werkstück mit einem flüssigen oder gasförmigen Wirkmedium befüllt und unter Druck in eine vorgegebene Werkzeugkontur geformt. Die Nutzung der Temperatur als Prozessparameter ist eine Möglichkeit, die Duktilität und das damit im Zusammenhang stehende Formänderungsvermögen von Leichtbauwerkstoffen wie Magnesium, Aluminium oder Titan, aber auch hochfesten Stählen (Presshärten) zu erhöhen.

Die Anwendung des Innenhochdruck-Umformens ermöglicht neben einer Verringerung des Energie- und Werkstoffeinsatzes auch die Einsparung von Fügeoperationen wie zum Beispiel dem Schweißen sowie die Umsetzung anwendungsoptimierter Formen und neuer Designideen.

Fügen im Innenhochdruck-Umformprozess

Beim Innenhochdruck-Umformen von rohrförmigen Halbzeugen ist es möglich, Bauteilkomponenten mit einem Profil sowohl kraft- als auch formschlüssig zu verbinden. Eine partielle Vergrößerung des Bauteilumfangs bildet dabei die Grundlage.

Durch die Integration der Fügeoperation in den endformgebenden Umformprozess sind hochgenaue und belastungsoptimierte Baugruppen, wie zum Beispiel komplette

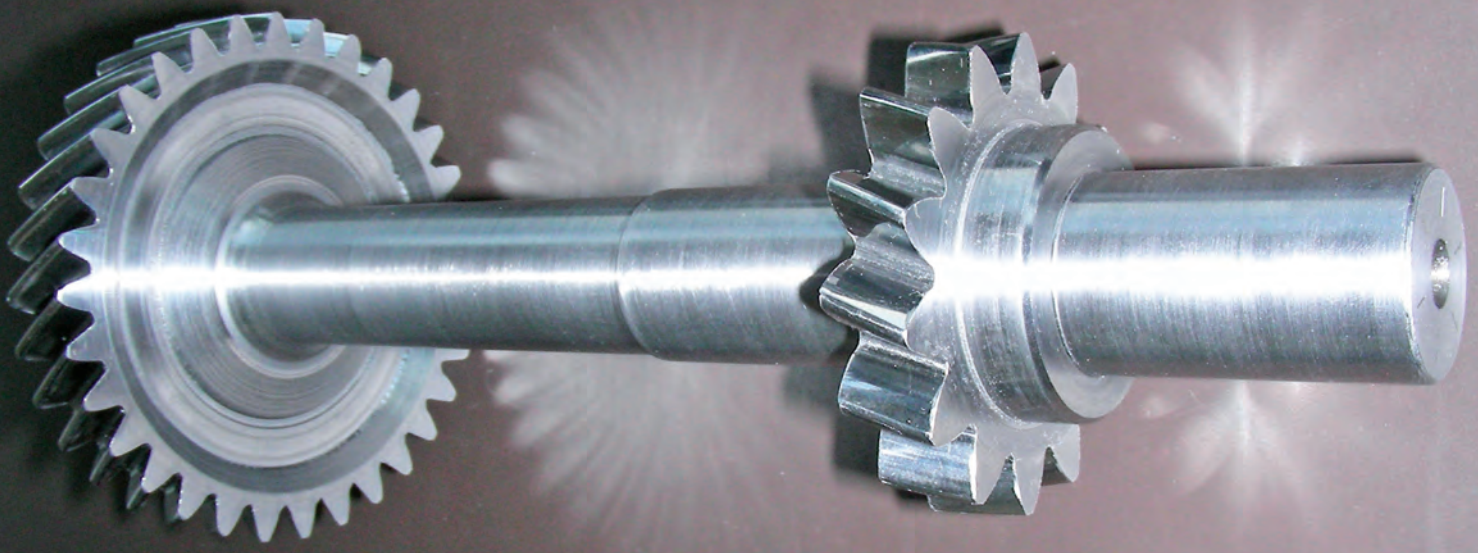
Nockenwellen, herstellbar. Auf Grundlage dieser meist kalten Fügeoperation können unterschiedlichste Werkstoffpaarungen miteinander verbunden und ein Wärmeeintrag in die Baugruppe vermieden werden.

Die belastungsgerechte Ausführung der Fügeverbindung durch das gezielte Einbringen von Hinterschnitten sowohl in radialer als auch axialer Richtung ermöglicht die Übertragung sehr hoher Drehmomente und Axialkräfte bei gleichzeitig verhältnismäßig dünnwandigen Hohlwellen. Neben dem Fügen zweier Hohlprofile können auch weitere Funktionselemente wie beispielsweise Zahnräder, Nocken oder Lager in die Umform- und Fügeoperation integriert werden. Eine eventuell erforderliche finale Feinbearbeitung, die im Allgemeinen nur aus einer Schleifoperation besteht, wird durch die hohe Fertigungsgenauigkeit des kombinierten Umform- und Fügeverfahrens erheblich reduziert.

Hohlwellen aus massiven Halbzeugen

Am Fraunhofer IWU werden Hohlwellen vornehmlich durch Fließpressen, Querwalzen und Bohrungsdrücken entwickelt und hergestellt.

Das am Fraunhofer IWU entwickelte Bohrungsdrücken ist ein inkrementelles Druckumformverfahren zur Herstellung axialsymmetrischer Hohlteile. Der durch die Drückrollen und den gleichzeitig axial wirkenden Formstempel verdrängte Werkstoff fließt entgegen der Vorschubrichtung axial ab und bildet so die Napfwand aus. Das Werkstück wird in einer Spanneinrichtung an der Spindel aufgenommen und rotiert um seine Längsachse. Der Drückstempel dreht sich synchron zur Spindel. Die Drückrollen und der Stempel führen eine synchrone axiale Bewegung aus. Das Verfahren kann als Kalt-, Halbwarm- oder Warmumformung ausgeführt werden. Durch Bohrungsdrücken wird die umformende Herstellung von Teilen mit kreiszylindrischen Innenformen, Innenprofilen und Innenpolygonen realisiert, die mit anderen Verfahren nicht effektiv erreichbar sind.



Wesentliche Vorteile gegenüber dem Tiefbohren und Fließpressen sind:

- hoher Materialausnutzungsgrad
- niedrige Bearbeitungszeiten
- gut Eignung für dicke Wandungen mit Absätzen
- inkrementelles Verfahren mit niedrigem Kraftbedarf

Die Grundform von Antriebs- und Getriebewellen kann bei Warmformgebungstemperatur auch durch Querwalzen äußerst produktiv hergestellt werden. Die Fertigung der Innenkontur erfolgt während des Querwalzens mit Hilfe gesteuerter Dorne. Die Wellenenden werden durch Radialschmieden oder Rundkneten verjüngt.

Das Fraunhofer IWU beschäftigt sich darüber hinaus mit dem Axialformen. Durch diese Technologie können komplexe Hohlkörper sehr endkonturnah produziert werden.

Umformtechnische Herstellung von Verzahnungen

Im Wettbewerb um eine ressourceneffiziente und vor allem wirtschaftliche Herstellung von Verzahnungsprofilen (Lauf- oder Hochverzahnungen für den Fahrzeugbau) konkurrieren zunehmend umformende mit den traditionellen spanenden Fertigungsverfahren. Die umformende Fertigung mit Hilfe von Rundwerkzeugen bietet dabei eine Reihe von Vorteilen. So können zum Beispiel in der Vorbearbeitung kosten- und energieintensive Teilprozesse wie das Wälzfräsen oder das Festigkeitsstrahlen substituiert werden.

Das Profilquerwalzen mit Rundwerkzeugen ist ein inkrementelles Umformverfahren mit abwälzender Kinematik zwischen Werkzeuggeometrie und entstehendem Werkstückprofil. Die rotationssymmetrische Ausgangsform ist dabei in axialer Richtung zwischen Spitzen gespannt. Die abwälzkinematische Entstehung des Verzahnungsprofils wird über einen durchmesserbezogenen Eindringvorgang der Werkzeugzähne in radialer Richtung realisiert. Der Walzprozess unterteilt sich in die Anwalz-, Eindring- und Kalibrierwalzphase.

Folgende wirtschaftliche und funktionale Vorteile konnten definiert werden:

- Verkürzung der Prozesskette
- Reduzierung der Vorbearbeitungszeiten um bis zu 20 Prozent
- Reduzierung des erforderlichen Einsatzmaterials um bis zu 30 Prozent
- Festigkeitszunahme der Zahnkontur durch Kaltverfestigung (bis zu 100 Prozent im Zahnfuß- und -flankenbereich); konturangepasster Faserverlauf
- spiegelblanke Oberflächenkonturen ($R_z = 1,5 \mu\text{m}$, $R_a = 0,5 \mu\text{m}$)
- reduzierte Kerbempfindlichkeit und erhöhte Dauerbruchfestigkeit

Am Fraunhofer IWU ist es gelungen, Zahnhöhenfaktoren bis zu $y = 2,8$ (speziell bei Laufverzahnungen) zu realisieren. Damit wurde der Nachweis erbracht, dass es in bestimmten Grenzbereichen möglich ist, auch Laufverzahnungen walztechnisch herzustellen.

Zukünftig sollen die erreichbaren Verzahnungsqualitäten optimiert sowie die wirtschaftlich walzbaren Grenzbereiche bei Lauf- oder Hochverzahnungen verifiziert und für die Serienfertigung vorbereitet werden.

Forschungsarbeiten zur umformtechnischen Herstellung von Verzahnungen schließen ebenfalls die Verfahren Schmieden, Fließpressen und Axialformen ein.

Zur Prüfung der Verzahnungen steht diverse Prüftechnik zur Verfügung.

*Laufverzahnung auf einer
Getriebewelle*

SPANENDE FERTIGUNGSVERFAHREN

Komplettbearbeitung rotationssymmetrischer Bauteile

Die spanende Fertigung rotationssymmetrischer Bauteile stellt hohe Ansprüche an Qualität und Produktivität entsprechender Prozesse und des dafür eingesetzten Equipments. Die effektive Komplettbearbeitung auf Dreh/Fräsbearbeitungszentren ist daher eine zentrale Entwicklungsaufgabe. Dies umfasst unter anderem die Integration zusätzlicher spanender Technologien in Drehmaschinen – wie zum Beispiel die des AbwälzfräSENS. Die Anwendung dieses Verfahrens im Dreh-Arbeitsgang hat durch Substitution des zusätzlichen, oftmals externen Arbeitsgangs einen signifikanten wirtschaftlichen Effekt. Zudem können Qualitätsmerkmale wie der Verzahnungs-Rundlauf positiv beeinflusst werden, da das Verzahnung in einer Aufspannung wie das Drehen stattfindet. Durch eine günstige Gestaltung der Bearbeitungsreihenfolge innerhalb des komplexen Arbeitsgangs kann darüber hinaus die Oberflächenqualität der Verzahnungen verbessert werden.

Ein weiterer Ansatzpunkt besteht in der Anwendung umformender Verfahren wie zum Beispiel dem Glatt- oder Festwalzen, aber auch dem Schleifen, Honen und Stoßen.

Bei der Bewertung der Effizienz von Fertigungsprozessen wird derzeit der Begriff der Wirtschaftlichkeit folgerichtig um den Terminus der energetischen und ökologischen Nachhaltigkeit erweitert. Aus diesem Grund ist auch die Betrachtung von Nebenprozessen ein wichtiges Entwicklungsfeld. Untersucht werden der Einsatz von Strategien der Trockenbearbeitung oder Minimalmengenschmierung sowie die Möglichkeiten alternativer Kühlmethoden wie die Anwendung von tiefgekühltem CO₂ oder einer Hochdruck-Kühlung bis 300 bar.

Hochgeschwindigkeitsschleifen

Mit dem Hochgeschwindigkeitsschleifen verbinden sich die Vorteile einer sehr hohen Produktivität und einer ausgezeichneten Fertigungsqualität. Beide Faktoren können die Fertigungskosten bedeutend senken. Aufgrund der höheren

Schnittgeschwindigkeiten müssen die Werkzeuge höhere Festigkeiten aufweisen. Das Verfahren war bisher nur mit superharten Schneidstoffen durchführbar. Durch Weiterentwicklungen sind die Hersteller jedoch inzwischen in der Lage, auch konventionelle, prozesssichere Schleifkörper herzustellen. Durch das Verfahren können Vorbearbeitungsprozesse ersetzt werden. Damit werden bestehende Prozessketten verkürzt, Produktionskapazitäten reduziert und Durchlaufzeiten minimiert. Die Gefahr der Bauteilschädigung durch Schleifbrand infolge thermischer Belastung sinkt. Die höheren Werkzeugkosten werden überkompensiert.

Unrundschleifen sowie ein reduzierter Kühlschmierstoffeinsatz sind weitere Entwicklungsthemen. Numerische Simulationen zum statischen, dynamischen und thermischen Verhalten unterstützen die Entwicklung von Bearbeitungsstrategien für die Bearbeitung von Leichtbaukomponenten.

Honen

Das Honen ist ein typisches Endbearbeitungsverfahren für Bohrungen. Es ermöglicht die Einhaltung enger Maß- und Formtoleranzen, wobei nahezu beliebige Oberflächenrauheiten gezielt erreicht werden können. Durch die verfahrensbedingte Oberflächenmorphologie in Form einer Kreuzriefenstruktur werden hervorragende tribologische Eigenschaften der Oberflächen erreicht. Nicht nur aus diesem Grund spielt das Honen im Bereich des Antriebsstrangs eine bedeutende Rolle. Hauptanwendungsbereich ist hier die Zylinderbohrung, aber auch Pleuelaugen und Lagergassen werden aus den genannten Gründen gehont. Durch gezielt erzeugte Formabweichungen vom Zylinder lassen sich durch das Formhonen unter Anwendung adaptiver Werkzeuge betriebsbedingte Verformungen kompensieren.

Trockenschleifen einer Nockenwelle



Das Kurzhub-Außenrundhonen (Finishen) wird im Fall sehr hoher Qualitätsanforderungen zur Glättung von Oberflächen eingesetzt. Hier liegen die Anwendungsfelder zum Beispiel bei der Bearbeitung von Wälzkörpern und Getriebewellen. Zusätzlich eignet es sich hervorragend zur Reduzierung von dominanten Welligkeiten und führt somit zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften von Lagerflächen, beispielsweise an Kurbelwellen, sowie zur Verbesserung des Form- und Geradheitszustands an hochpräzisen Zylinderflächen.

Hartfräsen

Das Fräsen von Stahlbauteilen in gehärtetem Zustand sowie von hochharten Werkstoffen bietet die Möglichkeit der Prozesskettenverkürzung und der Erzeugung qualitativ hochwertiger Konturen in Bezug auf Maß- und Formhaltigkeit sowie Oberflächengüte. Im Vergleich zu den zerspanenden Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide wird die Produktivität und Wirtschaftlichkeit verbessert.

Für die Bearbeitung von Lagersitzen im Powertrainbereich wird konventionell das Außenrundscheifen angewendet, bei dem sehr große Kühlschmierstoffmengen benötigt werden. Dieser ökonomische und ökologische Nachteil erforderte Überlegungen zum Einsatz alternativer Verfahren. Mit dem kühl-schmierstofffreien orthogonalen Feindrehfräsen werden die geforderten Qualitätsanforderungen erreicht und zudem die erwähnten Nachteile beseitigt. Bei der Anwendung an Kurbelwellen ist hier außerdem die geringe Drehzahl des Werkstücks mit den exzentrisch liegenden Lagersitzen vorteilhaft. Es werden in der Regel superharte Schneidstoffe verwendet. Die modellgestützte Analyse der Span- und Gratbildung sowie Maßnahmen der Werkzeugoptimierung sind dabei ebenfalls wesentliche Arbeitsinhalte.

Aufgrund der hohen Dichte können massive Hartmetallkomponenten im Powertrainbereich nicht eingesetzt werden. Thermisch gespritzte Hartmetallschichten sind eine Alternative, die konventionellen Methoden stoßen jedoch bei der Bearbeitung konturkomplexer Geometrien an ihre Grenzen.

Eine wirtschaftliche Bearbeitungsmöglichkeit ist das Fräsen von thermisch gespritzten Hartmetallen. Eine auf das Verfahren abgestimmte Prozessauslegung und Werkzeugauswahl ermöglicht eine deutliche Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Flexibilität. Neben einer nahezu schädigungsfreien Randzone zeichnet sich die Fräsbearbeitung von Hartmetall mit superharten Schneidstoffen zudem durch hervorragende Oberflächenqualitäten aus.

Ultraschallunterstütztes Tieflochbohren

Die Einführung neuer, hochfester Werkstoffe stellt ständig neue Herausforderungen an die Zerspantechnik. Mit Hilfe hybrider Prozesse für die spanende Bearbeitung lassen sich Wirkmechanismen von Prozessen gezielt durch überlagerte Energieformen beeinflussen.

Bei der Herstellung tiefer Bohrungen treten mit zunehmender Bohrtiefe häufig Probleme bei Spanbildung, Spanabfuhr, Werkzeugbeanspruchung und Prozesssicherheit auf. Die gezielte Einkopplung von Schwingungen in den konventionellen Fertigungsprozess ist eine Möglichkeit zur Beeinflussung des Spanbildungsmechanismus und somit der Spanlänge. Um bei hohen Frequenzen, zwischen 20 und 40 Kilohertz, die Schwingungsenergie optimal im Prozess zu nutzen, wird eine longitudinale Eigenschwingform des Werkzeugs durch Piezoaktoren angeregt. Mit Hilfe der numerischen Simulation kann die Wirkung des Ultraschalls in Bezug auf Werkzeugbelastung und Spanbildungsvorgang modellhaft analysiert werden.

Die Überlagerung von Ultraschall bei der Zerspaltung auch unter den erschwerten Bedingungen einer Minimalmengenschmierung ermöglicht einen verbesserten Prozessablauf. Dadurch werden nachweislich kürzere Späne mit einem daraus resultierenden leichteren Abtransport aus tiefen Bohrungen, reduzierte Bearbeitungskräfte, höhere Zeitspannvolumina und längere Werkzeug-Standzeiten erreicht.

KOMPETENZ IM ANTRIEBSSTRANG

Anwendungsbeispiele

Leichtbau-Nockenwelle

Im weltweiten Motorenbau sind neben der Emissionsreduktion (CO_2 , NO_x und PM) die Kosten- und vor allem die Masse-reduzierung wesentliche Entwicklungsschwerpunkte. Am Fraunhofer IWU wurden neue Technologien entwickelt, um Nockenwellen leichter und den Herstellungsprozess kostengünstiger zu gestalten.

Die Nockenwelle steuert die Ein- und Auslassventile eines Verbrennungsmotors, die für den Ladungswechsel im jeweiligen Zylinder erforderlich sind. Die Nocken müssen daher eine hohe Oberflächengenauigkeit besitzen und sehr verschleißfest sein. Traditionell werden Nockenwellen aus Vollmaterial geschmiedet oder gegossen. Sie sind hoch belastbar, jedoch sehr schwer. Das Rohschmiedeteil muss zudem einer aufwendigen Nacharbeit unterzogen werden.

Die Abkehr vom bisherigen Nockenwellendesign, die Verwendung eines rohrförmigen Halbzeugs und der Einsatz separat gefertigter Nocken führten zu gebauten Nockenwellen. Die Nocken werden form- oder kraftschlüssig auf den Rohr-Grundkörper gefügt. Dieser Nockenwellen-Typ besitzt ein geringeres Gewicht bei geringem Fertigungsaufwand.

Der Einsatz der Innenhochdruck-Umformtechnologie bot wesentliches Potential zur Massereduktion. Mit der Umsetzung dieser Technologie wurden konstruktive und technologische Lösungen zur Herstellung der zu fügenden Komponenten und der Integration von Funktionen in das Nockenwellenrohr entwickelt, die durch die Beibehaltung der wesentlichen Konstruktionsschnittstellen zur Motorperipherie als auch der gleichen Funktionsanforderungen mit dem heutigen Serienfertigungsstand kompatibel, das heißt austauschbar sind.

Die nächste Entwicklungsstufe ist die beschichtete und nitrierte Nockenwelle. Bei diesen innovativen Weiterentwicklungen der gebauten Nockenwellen sind die zu fügenden Nocken als Einzelkomponenten eliminiert. Sie werden im Innenhochdruck-

Umformprozess aus dem Rohr geformt. Eine Hartmetallbeschichtung gewährleistet bei der beschichteten Nockenwelle die notwendige Verschleißfestigkeit. Bei der nitrierten Nockenwelle wird im Anschluss an das IHU-Verfahren eine thermische Oberflächenhärtung durchgeführt. Zur Gewährleistung der erforderlichen Oberflächenhärte, einer genügenden Einhärtetiefe und einer ausreichenden Umformbarkeit beim Innenhochdruck-Umformprozess wird ein höherfester Stahl verwendet. Der Einsatz von Niedertemperaturverfahren ($< 550 \text{ }^\circ\text{C}$) wie Gas- und Plasma-Nitrieren minimiert den durch die Wärmebehandlung auftretenden Wärmeverzug der IHU-Teile. Diese Nockenwellen-Varianten führen zu einer nochmaligen Gewichtseinsparung. Durch den geringen Fertigungsaufwand ist die Herstellung zudem kostengünstig. Die Masse konnte bis zu 50 Prozent reduziert werden.

Alle entwickelten Prototypen wurden erfolgreich auf geschleppten und befeuerten Prüfständen erprobt.

Derzeit wird am Fraunhofer IWU an der neuesten Generation von Leichtbau-Nockenwellen geforscht. Diese sollen analog der nitrierten und beschichteten Nockenwelle monolithisch gestaltet sein. Die Innovation liegt in der Integration der Wärmebehandlung in den Umformprozess. Eine Herausforderung stellen die Umformgrade und Verschleißfestigkeiten dar, die in einem Prozessschritt erreicht werden müssen. Die Kombination von Innenhochdruck-Umformung und Presshärten soll zum einen eine Verkürzung der Prozesskette, zum anderen eine weitere Senkung von Kosten und Gewicht bewirken. Die bekannten Vorteile der Warmumformung wie geringe Rückfederung und hohe Formgenauigkeit können zu einer Reduzierung des Schleifaufmaßes führen.

IHU-Leichtbau-Nockenwelle



Leichtbaupleuel

Pleuel sind dynamisch hoch beanspruchte Motorbauteile. Ihre Auslegung und Konstruktion wird entscheidend durch die Schwingfestigkeit und die Betriebsfestigkeit bestimmt. Die Bauteilkomponenten Kurbelwelle, Pleuel, Kolben und Kolbenbolzen bilden den Kurbeltrieb eines Motors. Gewichtseinsparungen bei den oszillierenden Massen führen zu kleineren Massenkräften, was sich positiv auf die dynamischen Motoreigenschaften, den Kraftstoffverbrauch und die mechanischen Beanspruchungen im Kurbeltrieb auswirkt. Leichtere gebaute Kurbelwellen bieten daher auch für die Gesamtbaugruppe Kurbeltrieb neue Gestaltungsansätze.

Die veränderten Pleuelbeanspruchungen eröffnen neue Möglichkeiten für den Pleuelleichtbau. Dabei ist auch die allgemeine konstruktive Pleuelausführung mit einem geschlossenen bzw. einem offenen Steg zwischen dem kleinen und dem großen Auge zu betrachten.

Am Fraunhofer IWU wurden die statischen und dynamischen Eigenschaften verschiedener Pleuel untersucht. FEM-Simulationsrechnungen haben gezeigt, dass im Basismodell des Pleuels ein erhebliches Gewichtseinsparungspotential vorhanden ist. An verschiedenen neu entwickelten Pleueldesigns wurden durch FEM-Berechnungen zur Verformungs- und Festigkeitsanalyse die theoretischen Bauteileigenschaften ermittelt. Im Ergebnis dieser Entwicklung konnten Masseeinsparungen von bis zu 50 Prozent nachgewiesen werden. Das Ziel, ein dauerfestes Bauteil bei maximalem Leichtbau ohne Erhöhung der Fertigungskosten herzustellen, wurde ohne Einschränkungen erreicht. Schwingfestigkeitsuntersuchungen zur Lebensdauer des Pleuels zeigten, dass eine ausreichende Belastbarkeit des Pleuels gegenüber den notwendigen Anforderungen für den Motor vorhanden ist.

Im Rahmen von Verbundprojekten wurde ein Pkw-Leichtbaupleuel als Prototyp gefertigt und im befeuerten Motor unter Testbedingungen erprobt. Tests im Fahrbetrieb mit mehr als 30 000 Fahrkilometern wurden erfolgreich durchgeführt.

Gebaute Kurbelwelle

Für einen innovativen Leichtbaukurbeltrieb wurde im Hinblick auf eine Masseoptimierung, den Einsatz neuer Materialien sowie der Einsparung schwingungsdämpfender Bauteile am Motor die Kurbelwelle als gefügte Baugruppe gestaltet. Wesentliche Bestandteile sind die zum Beispiel als Feinschneidteile oder geschmiedete Wangensegmente ausgelegten Kurbelwellenwangen.

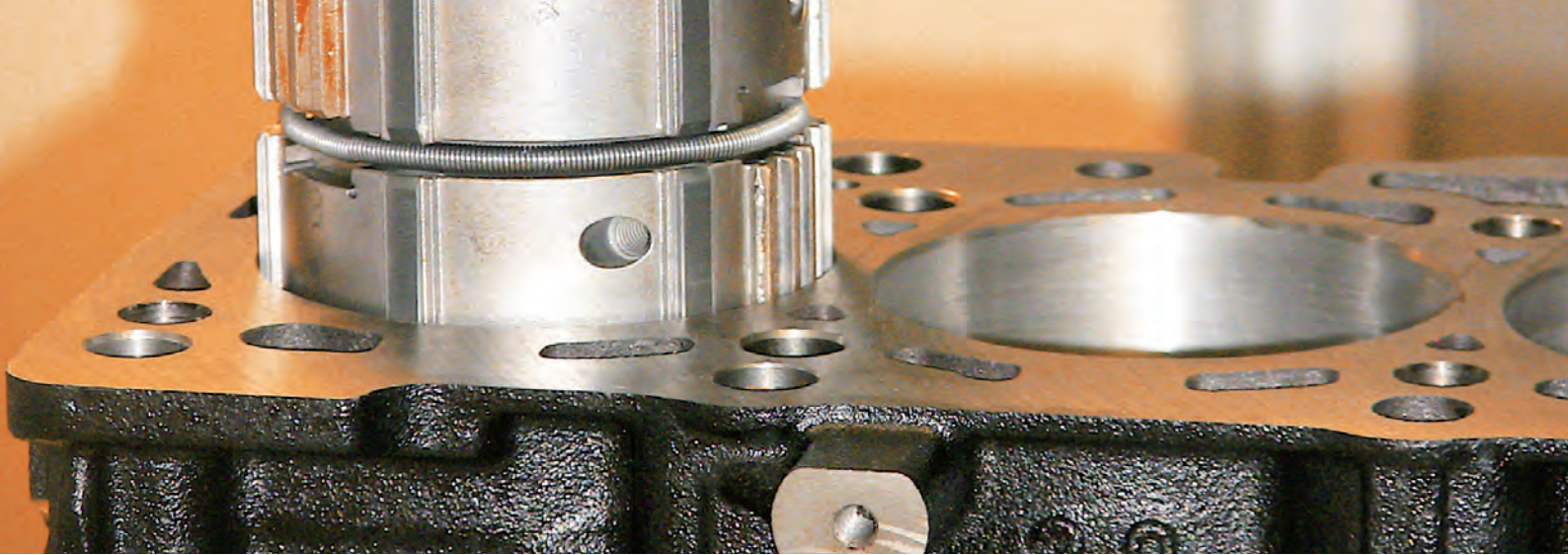
Eine Zielstellung war die Entwicklung von Geometrievarianten. Spezielle Konturelemente wie zum Beispiel Kragen oder Durchsetzungen schaffen eine Vergrößerung der Fügelänge für die Verbindung Wange – Lager und gewährleisten die Trennung von thermischer und geometrischer Kerbe. Dies führt zu einer Verbesserung der Bauteilsteifigkeit.

Die Haupt- und Pleuellagerwangen wurden im Blechdickenbereich von 11,5 und 12 Millimeter durch Feinschneiden bzw. aus geschmiedeten Wangensegmenten mit und ohne Gegengewicht hergestellt.

Komplex gefügter Leichtbaukurbeltrieb

In mehreren Projekten wurden Konzepte für hohle, gebaute Kurbelwellen untersucht. Dabei werden grundlegend verschiedene Lösungsansätze für niedrig und hoch belastete Verbrennungsmotoren realisiert.

Die Vorteile liegen unter anderem in der Masse- und Reibleistungsreduzierung, der hohen Flexibilität durch Anwendung des Baukastenprinzips sowie der beanspruchungsgerechten Werkstoffauswahl durch Kombination verschiedener Werkstoffe unter Beachtung der technischen und technologischen Machbarkeitskriterien.



Leichtbau-Getriebewelle

Die Fertigung von Getriebewellen ist umformtechnisch mit verschiedenen Technologien und in Kombination mit anderen Fertigungsverfahren möglich. Da Wellen hauptsächlich der Übertragung von Drehmomenten dienen und der Kern dabei nahezu unbelastet bleibt, ist bei der Anwendung von Hohlwellen eine Reduzierung der spezifischen Masse auf 70 Prozent bei annähernd gleicher Torsions- und Biegesteifigkeit erreichbar. Die Fertigung gestaltoptimierter Wellen setzt eine Angleichung der Innenkontur an die Außenform voraus. Das erfordert neue Prozessrouten, für die sich vor allem inkrementelle Verfahren der Massivumformung mit abwälzenden Werkzeugen eignen.

Neben dem Bohrungsdrücken kann die Grundform von Getriebewellen bei Warmformgebungstemperatur auch durch Querwalzen mit Taktzeiten von 6 bis 12 Sekunden äußerst produktiv hergestellt werden. Die Fertigung der Innenkontur erfolgt während des Querwalzens mit Hilfe gesteuerter Dorne. Die Wellenenden werden durch CNC-Radialschmieden verjüngt.

Um die Oberflächen- und Außenkonturen wie beispielsweise Zahnräder auszuformen, muss die Hohlwelle anschließend spanend bearbeitet werden. Abschließend wird sie wärmebehandelt und hart fertigbearbeitet.

Zylinderkurbelgehäuse

Bei Verbrennungsmotoren haben Zylinderformabweichungen entscheidenden Einfluss auf das tribologische System Kolben, Kolbenring und Zylinderlaufbahn. An der Kolbengruppe werden 70 bis 80 Prozent des ungewollten Ölverbrauchs verursacht. Der Reibungsanteil der Kolbengruppe kann ca. die Hälfte der gesamten Motorreibung betragen. Damit kommt der Reibungsreduzierung in diesem Bereich eine besondere Bedeutung zu.

Unter Umwelt- und Wirkungsgradgesichtspunkten besteht ein wesentliches Entwicklungsziel in der Minimierung der Zylinderformabweichungen der Bohrungen des Zylinderkurbelgehäuses im Betriebszustand des Verbrennungsmotors. Die Abweichungen von der idealen Zylinderform entstehen durch statischen Verzug, zum Beispiel durch Montage des Zylinderkopfes, quasistatischen Verzug infolge von Temperaturdifferenzen und unterschiedlichen Wärmeausdehnungen sowie dynamischen Verzug aufgrund von Gaskräften und durch den Kolben auf die Zylinderlaufbahn übertragene Kräfte. Es treten maximale Formabweichungen von der ideal zylindrischen Form in der Größenordnung von ca. 50 Mikrometer auf. Zum jetzigen Zeitpunkt kann der statische Verzug durch die Montage des Zylinderkopfes mit dem unwirtschaftlichen Einsatz von Honbrillen bei der Endbearbeitung kompensiert werden. Quasistatische und dynamische Zylinderverzüge können zurzeit weder konstruktiv noch fertigungstechnisch vollständig verhindert oder ausgeglichen werden.

Die fertigungstechnische Herausforderung besteht in der Entwicklung effektiver Feinbearbeitungsverfahren, die eine ausreichend flexible und produktive präventive Unrundbearbeitung ermöglichen. Am Fraunhofer IWU wurden unterschiedliche Verfahrensprinzipien entwickelt, welche die erforderliche hochdynamische Relativbewegung (Frequenz größer > 50 Hertz und Verstellwege von 10 bis 100 Mikrometer) zwischen Werkzeug und Werkstück realisieren. Hierbei kommen einachsige Bewegungen (adaptronische Werkzeuge) oder mehrachsige Bewegungen (Magnetspindel, sub-kinematic-System) jeweils in Kombination mit geeigneter Prozessführung und Messstrategien zur Anwendung, die dreidimensionale unrunde Konturen in Endbearbeitungsqualität gewährleisten.

*Adaptronisches Formhonen eines
Zylinderkurbelgehäuses*

AUSSTATTUNG

Maschinentechnik

- Kupplungsspindelpresse SPKA2000
- Axialgesenkwalze AGW80/250
- Flachbacken-Querwalzmaschine FBQ100/1600
- Rundbacken-Querwalzmaschine RBQ1000
- Bohrungsdrückmaschine BDM2000
- Mehrere hydraulische Pressen von 50...16 000 kN Presskraft
- Zwei Innenhochdruck-Umformanlagen (15 000 kN/700 MPa; 50 000 kN/400 MPa)
- Zweiwalzen-Profilwalzmaschine PWZ Spezial
- Dreiwalzen-Profilwalzmaschine 3PRD
- 5-Achs-Hexapod-Fräsmaschine Mikromat 6X HEXA
- 5-Achs-Multifunktionsmaschine Dynapod
- 5-Achs-Fräsmaschine DIGMA 850 HSC
- 5-Achs-Mikrobearbeitungszentrum KUGLER
- 5-Achs-Waagrecht-Bearbeitungszentrum HEC 630
- 4-Achs-Waagrecht-Bearbeitungszentrum HEC 500D XXL
- 3-Achs-Senkrecht-Bearbeitungszentrum CSK400
- CNC-Drehmaschine N20 mit Hochdruckeinheit
- Dreh-Fräszentrum GMX 250 linear
- Nagel VARIOHONE VSM 8-60 SV-NC
- Unrundscheifmaschine KEL-VARIA UR 175/1500
- Koordinatenschleifmaschine SkoE400

Software

- CAD-Systeme: Inventor, Pro/ENGINEER, CATIA u.a.
- Prozesssimulation: Forge, Simufact, LS-DYNA, AUTOFORM, PAM-STAMP, DEFORM u.a.
- CAM-Systeme: Tebis, GIB CAD&CAM Technomatics MLP
- Simulationssoftware: RealNC, NCSpeed
- Finite-Elemente-Software: ABAQUS, MARC, ANSYS, I-DEAS

Prüftechnik

- Koordinatenmessmaschine PRISMO7S-ACC (ZEISS)
- Diverse optische Rauheits- und Profilmessgeräte
- Konfokales Mikroskop, ITO Uni Stuttgart
- Weißlichtinterferometer, ITO Uni Stuttgart
- MikroCAD, GFM Teltow
- Vcheck, GFM Teltow
- Raster-Elektronen-Mikroskop, LEO Oberkochen; Stereomikroskop
- EDX-System, Oxford Instruments
- Optischer Messplatz UBM
- Tastende Rauheits- und Profilmessgeräte HOMMEL und Mitutoyo
- Formmessgerät F2002, HOMMEL
- Ultraschallwanddickenmessgeräte
- Profilprojektor PJ300
- Diverse Prozessmesstechnik für Bearbeitungskräfte und -temperaturen
- Hochgeschwindigkeitskamera
- Magnetoelastische Messtechnik (Barkhausenrauschen, BN)
- Zahnradverspannungsprüfstand
- Pulsatorprüfstand
- Metallographie; Härteprüfungen
- Ermittlung mechanischer und technologischer Kennwerte
- Belastungsabhängige Bauteilprüfung

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz

Telefon +49 371 5397-0
Fax +49 371 5397-1404
info@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

Institutsleiter

Wissenschaftsbereich Umformtechnik und Fügen
Prof. Dr.-Ing. Dirk Landgrebe

Hauptabteilung Blechumformung

Dipl.-Ing. Frank Schieck
Telefon +49 371 5397-1202
frank.schieck@iwu.fraunhofer.de

Hauptabteilung Massivumformung

Dr.-Ing. Andreas Sterzing
Telefon +49 371 5397-1221
andreas.sterzing@iwu.fraunhofer.de

Institutsleiter

**Wissenschaftsbereich Werkzeugmaschinen,
Produktionssysteme und Zerspanungstechnik**
Prof. Dr.-Ing. Matthias Putz

Hauptabteilung Zerspanungstechnik

Dipl.-Ing. Peter Blau
Telefon +49 371 5397-1109
peter.blau@iwu.fraunhofer.de