

5

Mechanische Auslegung der Hauptspindel anhand der Prozessparameter

*Dipl.-Ing. (FH) Michael Häußinger,
Dipl.-Ing. (FH) Hans-Christian Steinbach,
WEISS Spindeltechnologie GmbH,
Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Müller*

Abhängig von der Anwendung bzw. vom Einsatz der Spindel ist deren Auslegung vorzunehmen. Die jeweiligen veränderlichen Spindelparameter werden durch die Prozessgrößen Schnittgeschwindigkeit und Zerspankraft definiert. Liegt der Fokus der Bearbeitung beispielsweise auf Scherzerspannung mit hohen Schnittkräften und damit einhergehend geringen Schnittgeschwindigkeiten, dann muss die Auslegung der Hauptspindel anders erfolgen als bei einem Spindel­design für Hochgeschwindigkeitsbearbeitungen.

5.1 Motorauswahl

Die Motorauswahl hat tragenden Einfluss auf die korrekte Funktionalität der Hauptspindel. Bei modernen Hauptspindeln ist der **Antriebsmotor integriert**. Der Läufer ist Bestandteil der Spindelwelle und wird von deren Lagerung getragen. Die mechanische Kopplung zwischen Motorwelle und Spindelwelle kann entfallen. Durch den **Wegfall zusätzlicher Übertragungselemente** ergeben sich für den Anwender diverse Vorteile wie **ruhiger Lauf, geringerer Platzbedarf innerhalb der Werkzeugmaschine, höhere Genauigkeiten oder verbesserte Regeldynamik durch weniger Massenträgheit**. Die Übertragung des Drehmoments erfolgt berührungslos. Mechanischer Verschleiß ist ausgeschlossen. Die elektrische Leistung wird nur dem feststehenden Außenmantel des Motors zugeführt. Der Rotor benötigt keine eigenständige Leistungsversorgung.

Generell sind für den Einsatz in einer Motorspindel **synchrone oder asynchrone Einbaumotoren** vorgesehen und stehen in **verschiedenen Drehzahlklassen** zur Verfügung. Beide Varianten stellen bestimmte Anforderungen an die Leistungsumrichter, die bei der Auslegung der Werkzeugmaschine berücksichtigt werden müssen. Zusätzlich müssen unterschiedliche Vor- und Nachteile, abhängig vom gewünschten Einsatz, gegeneinander abgewogen werden.

Asynchronmaschinen sind weniger komplex in der Ansteuerung und bieten einen großen Feldschwäcbereich zur Realisierung höchster Drehzahlen bei gleichzeitig geringerem Strombedarf als vergleichbare Synchronmaschinen. Kurze Hochlaufzeiten können ebenfalls realisiert werden.

Synchrone Einbaumotoren bieten hohe Leistungsdichten durch die Permanent­erregung und ermöglichen kompakte Bauweisen bzw. lassen vergleichsweise große

Wellendurchmesser zu. Die Verlustleistung im unteren Drehzahlbereich ist gering. Bei schnelldrehenden Motoren besteht unter Umständen die Notwendigkeit des Einsatzes einer zusätzlichen Induktivität (Drossel). Dies ist im Aufbau des Motors begründet. Zusätzlich besteht mit Drosseln die Möglichkeit, durch Filterung hochfrequenter Signalanteile die Spannungsspitzen zu reduzieren und die Motorwicklungen zu entlasten.

Motorspindeln sind allgemein mit integrierten Kanälen zur **Flüssigkeitskühlung des Stators** ausgestattet. Der Stator, der die elektrische Antriebsleistung aufnimmt, ist die hauptsächliche Verlustwärmequelle der Spindeleinheit. Das Kühlkanalsystem ist deshalb thermisch eng an diesen gekoppelt. Allerdings werden auch die thermisch weiter entfernt liegenden Verlustwärmequellen durch das integrierte Kühlsystem versorgt und finden noch eine angemessen effiziente Wärmeabsenkung. Die Spindeleinheit selbst ist über eine **Vor- und Rücklaufleitung** mit dem Kühlmedium zu versorgen. Die Abkühlung des Kühlmediums auf die ursprüngliche Vorlauftemperatur erfolgt außerhalb der Spindel durch ein externes Kühl- oder Wärmetauschsystem. Den notwendigen Druck des Kühlmediums in der Vorlaufleitung liefert eine externe Pumpe. Beide Systeme liegen in der Zuständigkeit des Maschinenherstellers.

Zur **Überwachung der Motortemperatur** werden Temperatursensoren verwendet. Diese dienen dem Schutz vor Überlastung im drehenden Betrieb. Bei speziellen Einsatzbedingungen der Synchronmotoren (z. B. Belastung im Motorstillstand) ist eine **zusätzliche Überwachung** der Motorphasen zum Schutz vor Überlastung erforderlich. Diese wird über einen PTC-(Positive Temperature Coefficient)Kaltleiterdrilling realisiert. Optional stehen auch NTC-(Negative Temperature Coefficient)Heißeleiter zur Verfügung. Diese kommen zum Einsatz, wenn der verwendete Umrichter die Auswertung der KTY-Sensoren nicht erlaubt.

5.2 Lagerung

Die Lagerung einer Hauptspindel hat die Aufgabe, diese hochgenau zu führen und die Bearbeitungskräfte aufzunehmen. Abhängig von den geforderten Prozessparametern variieren die Lagerauswahl und deren Anordnung. Den Großteil der eingesetzten Lager stellen Wälzlager dar.

Für Spindeln in Werkzeugmaschinen werden bei **Wälzlagern** fast ausschließlich erhöhte Genauigkeitsklassen verwendet. Hauptsächlich die Bauarten Schrägkugellager, Radial-Schrägkugellager, Spindelager (mit Druckwinkel 15 und 25°), zweiseitig wirkende Axial-Schrägkugellager, Radial- und Axial-Zylinderrollenlager sowie gelegentlich Kegelrollenlager. Je nach den geforderten Leistungsdaten einer Werkzeugmaschine wird die Lagerung mit Kugel- oder Rollenlagern nach den Kriterien Steifigkeit, Reibungsverhalten, Genauigkeit, Drehzahleignung, Schmierung und Abdichtung konstruiert und ausgelegt. Abhängig vom Drehzahlbereich kommen bei Wälzlagern unterschiedliche Materialien wie Stahl und Keramik zum Einsatz. Bei extremen Anforderungen an Laufgenauigkeit und Dämpfung werden darüber hinaus hydrodynamisch oder hydrostatisch gelagerte Spindeleinheiten eingesetzt. Aus einer Vielzahl möglicher Werkzeugmaschinenlagerungen haben sich einige charakteristische Lageranordnungen herausgebildet, die sich im Werkzeugmaschinenbau bewährt haben.

Stehen **hohe Zerspankräfte und geringe Drehzahlen** im Vordergrund, müssen die Lager eine hohe Steifigkeit vorweisen und die Spindel radial und axial genau führen. Durch große Wellen- und Lagerdurchmesser wird dies erreicht. Eine starre Lageranstellung mit entsprechend eingestellter Vorspannung erzeugt die gewünschte Genauigkeit. Bei Anforderungen an sehr hohe Drehzahlen hingegen muss die Lagerung besonders den thermischen und dynamischen Betriebsbedingungen

gerecht werden. Besonders geeignet sind **Hybrid-Spindellager mit Keramikku-geln**. Die Lagerpaare sind antriebs- und abtriebsseitig über Federn mit definierter Vorspannung gegeneinander angestellt. Dies ermöglicht eine zwanglose Kompensation der axialen Längsdehnung durch thermische und dynamische Einflüsse. Optionale Kugelbüchsen unterstützen die radiale Steifigkeit zusätzlich. Bei vorschriftsmäßigem Betrieb der Spindelkühlung, Einhaltung der zulässigen Lagerbelastung und Berücksichtigung der maximal erlaubten Umgebungstemperatur im Betriebszustand ist gewährleistet, dass die zulässige Lager-temperatur nicht überschritten wird.

5.3 Schmierung

Um während des Einsatzes der Spindel im Bearbeitungsvorgang eine ausreichende Gebrauchsdauer sowie einen verschleißfreien Lauf sicherzustellen, ist ein Schmierfilm im Reibkontakt unabdingbar. Damit dies gewährleistet werden kann, ist ein Schmierstoff mit den notwendigen Eigenschaften auszuwählen, sowie dessen Anwesenheit zu jeder Zeit des Betriebs sicherzustellen. Generell kann zwischen Fettschmierung und Öl-Luft-Schmierung unterschieden werden. Die **Fettschmie-rung** wird vorzugsweise bei geringeren Drehzahlenanforderungen eingesetzt. Ihre Vorteile liegen in der geringen Reibung, der vereinfachten Spindelkonstruktion und den vergleichsweise niedrigen Systemkosten. Bei Einhaltung der jeweiligen Belastbarkeitsgrenzen einer Spindel bestimmt die Fettgebrauchsdauer die Lebensdauer der Lager. Die Fettgebrauchsdauer ist als die Zeit definiert, in der die Lagerfunktion durch den eingebrachten Schmierstoff aufrechterhalten wird. Die Fettgebrauchsdauer ist nicht von der Lagerbelastung abhängig, sinkt allerdings mit zunehmender Drehzahl. Maßgeblicher Einfluss auf die Fettgebrauchsdauer geht von der Fettmenge, der Fettart, des Lagerdesigns, so-

wie Drehzahl, Temperatur und den Einbau-bedingungen aus.

Die zweite Schmierungsart ist die **Öl-Luft-Schmierung**. Zur Schmierung von Spindellagern reicht sehr wenig Öl aus. Es genügen bereits Mengen in der Größenordnung von ca. 100 mm³/h (ein Tropfen hat ca. 30 mm³), wenn sichergestellt ist, dass alle Roll- und Gleitflächen vom Öl benetzt werden. Eine solche **Minimalmengen-schmierung** ergibt geringe Reibungsverluste. Ölminimalmengen-Schmierung wird angewandt, wenn die Spindeldrehzahl für Fettschmierung zu hoch ist. Das Standardverfahren ist heute die Öl-Luft-Schmierung. Bewährt haben sich Öle nach der Bezeichnung ISO VG 68 + EP, das heißt: Nennviskosität 68 mm²/s bei 40 °C und Extrem-Pressure-Zusätze. Hierbei sind vorzugsweise durchsichtige Schläuche mit Innendurchmesser 2 – 4 mm zu verwenden, um den Schmierstofftransport überwachen zu können. Die feine Tröpfchenbildung entsteht durch die überströmende Luft bei 1 – 5 bar und ist ab Schlauchlängen ab 400 mm gewährleistet. Spezifische Strömungsverhältnisse in der Lagerung können die Ölmenge deutlich beeinflussen.

5.4 Bearbeitungsprozesse

Fräsen

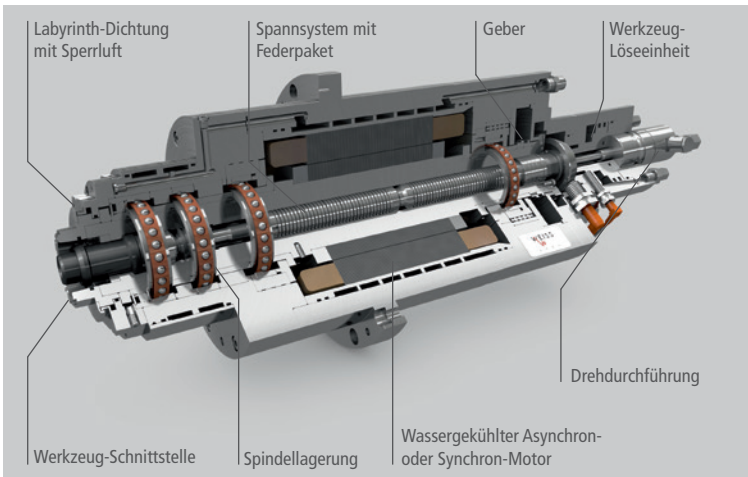
Charakteristisch für Frässpindeln (*Bild 5.1*) ist der Einsatz standardisierter **Werkzeugaufnahmen**. Standardisierung setzt Anpassung an die Bedürfnisse voraus. Sie bietet den Herstellern von Werkzeugmaschinen bzw. Spindeleinheiten die Möglichkeit, durch den einfachen Austausch der Zange mit Halter unterschiedliche Steilkegelwerkzeuge (Kegel-/Anzugsbolzen-Norm) oder Hohlschaftkegelwerkzeuge zu spannen. Verschiedene Ausführungen von Werkzeugspannern mit oder ohne Kühlschmiermittelzuführung, mit hydraulischen oder pneumatischen Löseeinheiten können in die gleichen Werkzeugspindeln einge-

baut werden. Drehdurchführungen und Löseeinheiten sind untereinander kompatibel und austauschbar.

Grundsätzlich wird zwischen **Steilkegelaufnahmen (SK, BT) und Hohl-schaftkegel-(HSK-)Werkzeugaufnahmen** unterschieden. Beide haben typenspezifische Eigenschaften mit Vor- und Nachteilen. Bei Werkzeugsystemen für Spindeln bis 10 000 rpm werden oft Steilkegelwerk-

zeuge nach DIN 69871 Teil 1 eingesetzt (auf Anfrage bei den entsprechenden Zulieferern sind auch höhere Drehzahlen möglich).

5-Achs-Spindel-einheiten werden ebenso unterstützt wie Überkopfbearbeitungen. Sicheres Zerspanen ist in jedem Winkel möglich. Nachteilig ist die begrenzte Drehzahlleistung. Bei hohen Drehzahlen weitet sich die Spindel durch die Zentrifugalkraft



bit.ly/3bTsFOx
Video 13



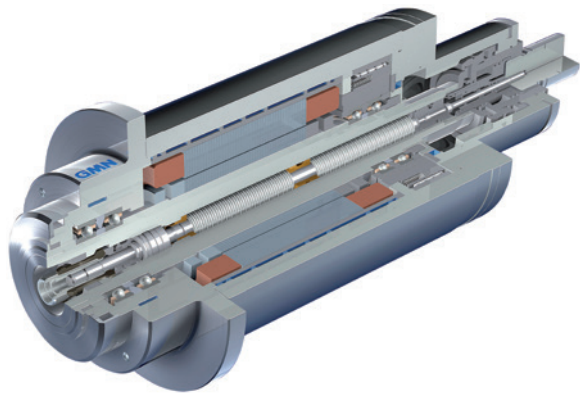
bit.ly/2xSal6t
Video 14

Bild 5.1a: Aufbau einer Frässpindel. (Quelle: Weiss, Schweinfurt)

Bild 5.1b: Werkzeugspindel für den automatischen Werkzeugwechsel. (Quelle: GMN Nürnberg)

Im Lehrfilm werden gezeigt:

- Flüssigkeitskühlung von Lagerung und Motor
- Kühlmittelzufuhr an den Fräser durch Welle und Gehäuse
- Automatischer WZ-Wechsel und Zugstangen-Überwachung
- Kegelreinigung der WZ-Aufnahme mittels Luft
- Öl-/Luft-Schmierung der vorderen und hinteren Lager
- Sensor zur Messung der Axialen Wellenverlagerung
- Sperrluft gegen Eindringen von Schmutzpartikeln von außen
- Drehwinkelgeber zur Positionierung der Spindel
- Temperaturmessung am vorderen Lager zum Ausgleich der Axialen Wellenbewegung



auf. Der Steilkegel kann tiefer in die Spindel eingezogen werden und sich verklemmen.

Die Beschleunigung von Bearbeitungsvorgängen im Werkzeug- und Formenbau und in der zerspanenden Industrie durch **High Speed Cutting (HSC)** erfordert auch Lösungen für schnellere Werkzeugwechsel. HSK-Spannsätze werden den gestiegenen Anforderungen gerecht. Das Hauptunterscheidungsmerkmal dieser Schnittstelle im Vergleich zur SK-Werkzeugaufnahme ist die **zusätzliche Plananlage an der Stirnseite** der Welle. Durch diese Abstützung am Bund wird eine deutlich höhere Biegefestigkeit als bei vergleichbaren Steilkegelwerkzeugen erreicht. Zusätzlich ermöglicht die Plananlage eine **axiale Positioniergenauigkeit** im Mikrometerbereich. Formschlüssige, enge Kegeltoleranzen verhindern Rundlauffehler.

Die **maximalen Drehzahlen der Spannsysteme** reichen dabei von ca. 40 000 rpm bei einer HSK-A63 Werkzeugaufnahme bis hin zu 60 000 rpm bei HSK-A32 Schnittstellengrößen. Der nachteiligen Aufweitung der Spindel durch die Zentrifugalkraft und das daraus resultierende Einziehen des Werkzeugs in die Spindel wird durch die Plananlage entgegengewirkt. Zusätzlich sind die Spannelemente so angeordnet, dass diese bei höheren Fliehkräften zwar nach außen gedrückt werden, dies jedoch eine Spannkraftverstärkung bewirkt. Drehmomente werden über den Reibschluss des Kegels, sowie über zusätzliche Mitnehmersteine am Schaftende übertragen.

Mit steigenden Anforderungen an den Spindelhochlauf sind zunehmend auch die **Nebenzeiten beim Werkzeugwechsel** entscheidend. Für eine möglichst geringe Werkzeugwechselzeit sind **leistungsfähige Löseeinheiten** erforderlich. Die Löseeinheit hat die Aufgabe ein eingezogenes Werkzeug aus der Spindel zu lösen. Dazu muss im hinteren Teil der Spindel ein Lösekolben auf das Spannsystem drücken, um so gegen das Federpaket des Spannsys-

tems wirkend das Werkzeug auszustoßen. Üblicherweise werden Löseeinheiten hydraulisch oder pneumatisch betätigt, es gibt für hydraulikfreie Maschinenkonzepte aber auch elektrisch betätigte Löseeinheiten. Alle drei Konzepte können in modernen Werkzeugspindeln zu identischen Werkzeugwechselzeiten führen.

Schleifen

Beim Schleifen sind Werkzeugaufnahmen mit Innen- oder Aussenkegel sowie zylindrische Aufnahmen zum manuellen Spannen einer Schleifscheibenaufnahme üblich. Darüber hinaus werden für automatischen Schleifscheibenwechsel auch **Werkzeugaufnahmen mit Hohlschaftkegel** eingesetzt.

Schleifspindeln werden grundsätzlich in **Innenrund- und Außenrundscheifen** unterschieden. Außenrundscheifspindeln eignen sich darüber hinaus auch zum Flachsleifen. Je nach Verfahren sind verschiedene Schleifscheibenaufnahmen und Schleifscheibendurchmesser notwendig. Die Größe des Schleifkörpers bestimmt die Betriebsdrehzahl der Spindeln. Ebenfalls das Material des Schleifkörpers ist entscheidend für die Betriebsdrehzahl. Als Unterscheidungsmerkmale dienen hier die verschiedenen Schleifmittel (Korund, Siliziumkarbid, CBN, etc.) und unterschiedliche Bindematerialien (Keramik, Kunstharze, etc.).

Da das Schleifen oftmals der letzte Arbeitsgang innerhalb eines Herstellungsprozesses ist, ist die **Gleichmäßigkeit der Oberfläche** von entscheidender Bedeutung. Deshalb muss auf die Anordnung der Wälzlager stets besonderes Augenmerk gelegt werden. Eine starre Anstellung der Lager zueinander ist zu bevorzugen (*Bild 5.2*), infolge dessen die Drehzahleignung allerdings stark einschränkt wird. Gleichzeitig stellt sich das Bearbeitungsergebnis aufgrund geringerer Wellenbewegung qualitativ höherwertig dar. Gerade bei Innen-

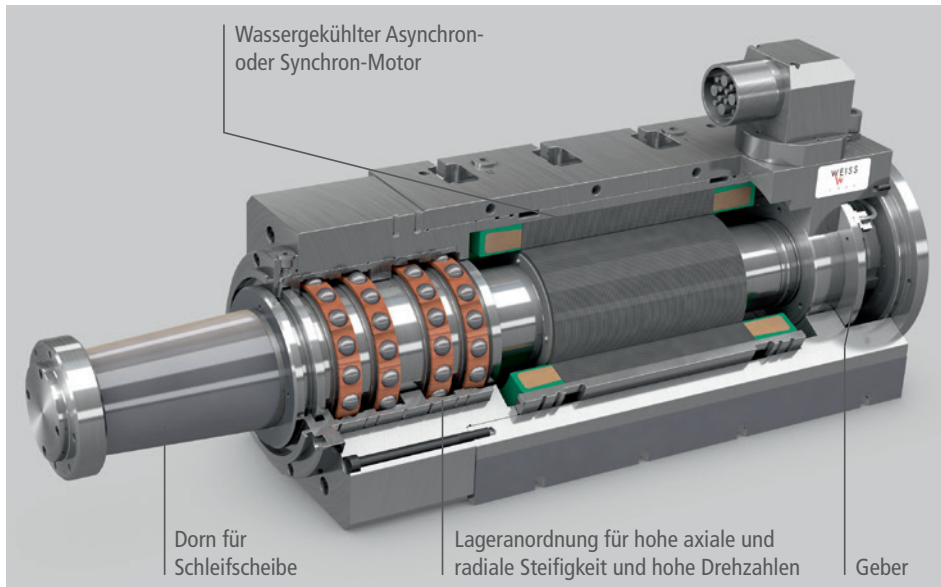


Bild 5.2: Aufbau einer Schleifspindel. (Quelle: Weiss, Schweinfurt)

rundsleifspindeln werden häufig auch Hochgeschwindigkeitsspindeln eingesetzt, hier muss das Lagerungskonzept jedoch den kinematischen Bedingungen angepasst werden. Dadurch müssen Abstriche in der Steifigkeit der Spindel und somit unter Umständen auch in der Oberflächen-güte der bearbeiteten Teile hingenommen werden.

Der Schleifprozess erfordert häufig, dass die Spindel mit **Dauerdrehzahl** (S1) betrieben wird. Gerade für den Betrieb bei hohen Dauerdrehzahlen wird die Öl-Luftschmierung für die Lagerung bevorzugt. Fettlebensdauer geschmierte Lager sind für einen Einsatz bei Dauerdrehzahlen nahe ihrem maximal zulässigen Drehzahlkennwert ungeeignet, da das Schmiermedium erhöhten Verschleiß erfährt und Lager durch unzureichende Schmierung frühzeitig ausfallen können.

Bei Anwendungen mit größeren Schleifscheibendurchmessern kommen häufig **Wuchtsysteme** zum Einsatz, die die Restunwucht des Schleifkörpers während

des Betriebes kompensieren. Hier gibt es eine Vielzahl von patentierten Systemen unterschiedlicher Hersteller, die Aufnahme des Wuchtsystems liegt meist zentral in der Spindelwelle.

Einbaumotoren der Motorsleifspindeln können in **Synchron- oder Asynchrontechnik** ausgeführt sein. Gerade bei Asynchrontechnik wird häufig noch die Spindel geberlos betrieben, d. h. es wird auf einen Drehgeber verzichtet. Allerdings ist hier das Sicherheitskonzept der Maschine zu bewerten.

Drehen

Spindeln für Drehmaschinen zeichnen sich vor allem durch **genormte Schnittstellen für Spannfutter** zur Werkstückaufnahme aus. In Europa werden vor allem die Kurzkegelaufnahmen A3 – A20 nach DIN 55026 und 55027 verwendet. Bei DIN 55026 (ISO 702/1) wird das Drehfutter von vorne mit Inbusschrauben befestigt. Die Gewindebohrungen befinden sich direkt in der

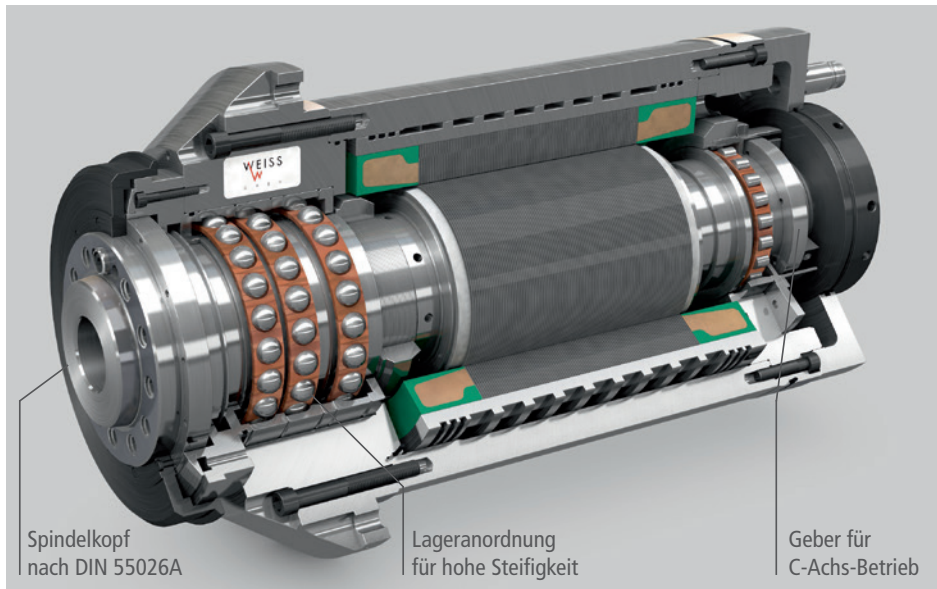


Bild 5.3: Aufbau einer Drehspindel. (Quelle: Weiss, Schweinfurt)

Spindelnase. Bei DIN 55027 (ISO 702/III) wird das Drehfutter über Befestigungsbolzen verspannt, ähnlich auch DIN 55021 und DIN 55022. In asiatischen Maschinen findet man häufig auch Schnittstellen nach DIN 55029 (ISO 702/II), auch als „Cam-lock“-Aufnahmen bezeichnet. Neben manuellen Spannfutterbetätigungen gibt es auch Spannfutter mit **automatischer Werkstückklemmung**. Dafür werden am Spindelende Hydraulikzylinder aufgesetzt, die über eine Zugstange durch eine Bohrung in der Spindelwelle das Spannfutter betätigen.

Aus dem Bearbeitungsprozess ergeben sich für Drehspindeln meist **hohe Steifigkeitsanforderungen**. Die arbeitsseitige Lagerung muss die Spindel bei hohen axialen und radialen Beanspruchungen genau führen und darf nur wenig Nachgiebigkeit aufweisen. Dafür werden für kleine bis mittlere Drehzahlenanforderungen vorzugsweise starr verspannte Lageranordnungen gewählt. Hierbei kommen meist hoch-

genaue Spindellager zum Einsatz (Bild 5.3). Für **erhöhte Bearbeitungskräfte** werden auch Lageranordnungen mit radialwirkenden Zylinderrollenlagern, in Kombination mit Axiallagern verwendet. Lagersysteme mit gegeneinander verspannten Kegelrollenlagern finden eher selten Anwendung. Für **hohe Drehzahlenanforderungen** werden auch federnd angestellte Lagersysteme verwendet, diese bieten gegenüber der starren Lagerung allerdings Nachteile in der Steifigkeit, vor allem zulässige Zugkräfte sind eingeschränkt. Die Lagereinheiten in Drehspindeln sind überwiegend Fettlebensdauer geschmiert. Die Lagerlebensdauer wird somit über die Fettgebrauchsdauer definiert.

Der C-Achsbetrieb erfordert in Drehspindeln eine erhöhte Auflösung des Drehgebers, hier helfen optische oder magnetische Drehgeber mit erhöhter Strichzahl.

Drehspindeln haben gelegentlich auch Gehäuse mit offenen Kühlmanschetten. Die so genannte Cartridge-Ausführung nutzt den

Spindelstock der Maschine als Gehäuse, die O-Ringe zur Abdichtung des Kühlwasserraumes werden auf die Spindel montiert.

5.5 Anforderungen an die Hauptspindel bezüglich Industrie 4.0

Der Begriff Industrie 4.0 wird verwendet um jedwede Form der Vernetzung von Produktentstehung, Produktion, Logistik und sekundären Aufgaben einer Fabrik zu erklären. Im Grundgedanken der vierten industriellen Revolution soll mithilfe moderner Informations- und Kommunikationstechnologie die Qualität von Produkten gesteigert und gleichermaßen die Produktivität und Flexibilität in der Fertigung erhöht werden.

Die Anforderungen an die Hauptspindel leiten sich vom ganzheitlichen Ansatz aller an der Produktherstellung beteiligten Prozesse ab. Im Wesentlichen werden die Anforderungen an die Qualität der Hauptspindel wie Genauigkeiten, Lebensdauer, Thermostabilität und Verfügbarkeit steigen. Um eine intelligente Vernetzung der Maschine mit vor- und nachgelagerten Prozessen zu erreichen, reicht es nicht aus, die Spindel mit beliebig vielen Sensoren zur Überwachung der Bearbeitung zu ergänzen. Die intelligente, sich selbst steuernde Werkzeugmaschine kann nur funktionieren, wenn alle Parameter im Prozess unter Kontrolle sind. Um die Verfügbarkeit einer Maschine 24 h/7 Tage die Woche zu gewährleisten, müssen alle Einzelkomponenten zusammenpassen. Zum Beispiel müssen die Werkzeuge gut gewuchtet sein, die Spindel von guter Rund- und Planlaufqualität sein, weiterhin die Schwankungen der Werkstücke durch Aufspannung oder Vorfertigung in der Toleranz gehalten werden. Vordefinierte Abschaltgrenzen führen sonst häufig zum unerwünschten Ausstieg der Maschine aus dem Fertigungsprozess und zu Stillstandszeiten.

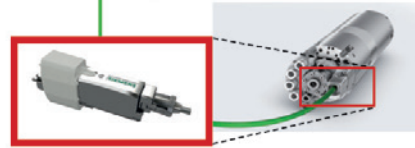
Auch in der Einzel- und Lohnfertigung mit geringen Losgrößen lohnt sich eine intelligente Simulation des Prozesses, um ohne manuellen Eingriff den Produktionsprozess überprüfen zu können. Eine der Hauptausfallursachen von Maschinen ist eine Kollision der Hauptspindel. Sind Störkonturen bereits in der Simulation bekannt, so verhindert das Programm einen ungewollten Kontakt. Kann man Prozessschritte weglassen, sind weiterhin Steigerungen der Produktivität möglich.

Bisher wurden in Hauptspindeln neben der Drehzahl und einiger analoger oder digitaler Näherungssensoren nur Temperaturen, gelegentlich auch Schwingungen durch Beschleunigungsaufnehmer überwacht. Die Daten wurden mit vorher eingegebenen Warn- und Abschaltgrenzen in der Steuerung verglichen und führten bei Überschreitung dieser zur Warnung, schlimmstenfalls zum Ausstieg der Maschine aus dem Fertigungsprogramm. Der Maschinenbediener musste dann aufgrund einer mehr oder weniger aussagekräftigen Fehlermeldung in der Steuerung auf die Ursache schließen. Immer wieder werden Hauptspindeln ausgebaut und zur Überprüfung geschickt, obwohl die Ursache des Fehlers an anderer Stelle zu suchen ist. Eine deutliche Verbesserung könnte erreicht werden, wenn die Signale der einzelnen Sensoren mit der Steuerung vernetzt sind, z. B. über CAN-Bus-Systeme.

Nicht selten werden in Maschinen die Signale durch eine Vielzahl elektronischer Bauteile gestört. Leitungen werden häufig über mehrere Meter an stark belasteten Leistungskabeln vorbei zur Steuerung geführt, wodurch es immer wieder zu Schwierigkeiten mit EMV-Störungen (Elektromagnetische Verträglichkeit) kommt. Solche Einflüsse führen zu falschen Informationen in der CNC und so zu Fehlinterpretationen. Moderne Hauptspindeln haben aus diesen Gründen integrierte Sensormodule, die analoge Sensorsignale in der Spindel verarbeiten, in digitale Signale umwandeln



Bild 5.4: Spindel mit Sensormodul.
(Quelle: Weiss Spindeltechnologie GmbH)



bit.ly/2V8xazU
Video 15

und diese über ein Netzkabel an die Steuerung weitergeben (Bild 5.4). Die digitale Signalübertragung erfolgt störungsfrei und vermeidet so den Informationsverlust.

Ein weiterer Vorteil dieser integrierten Sensormodule ist, dass die vorhandenen Daten in der Spindel gespeichert werden können und so für den Spindellieferanten, dem Service des Maschinenherstellers als auch der Wartungsabteilung des Endanwenders auslesbar sind. Damit lässt sich die tatsächliche Nutzung der Spindeln in Bezug auf Drehzahlen, Leistung oder Drehmoment prüfen und kann dahingehend

optimiert werden. Weiterhin lassen sich so frühzeitig Veränderungen des Spindelzustandes erkennen und eine Wartung oder Austausch besser planen.

Moderne CNCs bieten zusätzlich eine eigene integrierte Benutzeroberfläche für die Spindel diagnose an. Oben genannte Informationen wie Drehzahl-, Leistungs- und Drehmomentcluster, Werkzeugspannzustände von Frässpindeln oder tatsächliche Spindelaufzeiten (Spindel dreht) lassen sich so bedienerfreundlich auslesen (Bild 5.5).

Stichwortverzeichnis

A

Abrasiv-Schneiden 345
Abrichten von Schleifscheiben 310
Abrichtgerät 310
Abrichtwerkzeuge 310, 320
Abrichtzyklen 312
ABS-Kupplung 483, 486
absolute Messung 80
Absolutmaße 566
Absolutmaßprogrammierung 567
abstandscodierte Referenzmarken 80
Achsantriebe 464
Achshezeichnung 67
Achsen, asynchrone 119
Achsen sperren 119
Achsen, synchrone 122
Achsen tauschen 123
Achsmechanik 218
Achseelung 446
Achseichtung, positive 69
Adaptive Control (AC) 142
Adaptive Controls 754
Adaptive Feed Control 144
Adaptives Bearbeiten 636
Adaptive Vorschubregelung 142
Additive Fertigungsverfahren 367
Additive Manufacturing 709
AGV (Automated Guided Vehicles) 413
Analoge Regelung 219
angetriebene Werkzeuge 483
angetriebene Werkzeugspindeln 347
Ankratzen 585
Anpassprogramm 117
Anpassteil 49
Antriebe, analog/digital 246
Antriebsleistung 265
Antriebsregelung 217
Antriebsregler 235
Antriebstechnik 221

Anzeigen in CNC 163
Apps 170
Äquidistantenkorrektur 593
Arbeiten von der Stange 110
Arbeitsereichternde Grafiken 623
Arbeitsfeldbegrenzung 123
Asynchrone Unterprogramme 124
Asynchronmotor 240, 254, 256
Aufspannplanung 642
Ausbildung und Schulung 659
Auslegerbohrmaschinen 322
Ausspindelwerkzeuge 486
Auswahl des geeigneten Programmiersystems 625
Automated Guided Vehicles (AGV) 415
Automatische Systemdiagnosen 124
Automatisierung 51, 68
- flexible 456
- gleitende 449
AWL - Anweisungsliste 195

B

Bahnsteuerung 44, 290
Balance Cutting 125
Bandsägen 325
BDE/MDE 118
Bearbeitungsstrategien 635
Bearbeitungszentrum 104, 209, 285
- mehrspindliges 294
Bedienung 55, 324
Bedienungspersonal 340
Betriebssystem 43, 117
Bezugspunkte 571
Big Data 162, 726
Binder jetting 390
Blindleistung 467
Blindstrom 467
Blindstromanteil 465

Blockzykluszeit 125, 152, 297
 Bohr-Gewindefräsvorfahren 492
 Bohrmaschinen 208, 322
 Bohrstangen mit Feindreheinsätzen 488
 Bohrwerk 323
 Bohrzentren 323
 Bohrzyklen 290, 571
 Bohrzyklen G80 – G89 571
 Brennschneiden 330
 Bridge 693
 Build-Prozessor 392
 Bussysteme 458

C

C-Achsbetrieb 257, 277
 C-Achse 304
 CAD 701
 CAD-CAM Kopplung 370
 CAD/CAM Programmierung und Fertigung 612
 CAD/CAM-Systeme 713
 CAE-Software 704
 CAI (Computer Assisted Inspection) 362
 CAM-basierte CNC-Zerspanungsstrategien 614
 CAM (Computer Aided Manufacturing) 701, 704, 714
 CAM-orientierte Geometrie-Manipulation 634
 CAPP (Computer Aided Process Planning) 705
 CAPTO-Aufnahmen 482
 CA-Systeme 703
 CBN 480
 CFK-Werkstoffe 297
 CIM 701
 Closed Loop-Technologie 73
 Cloud 758
 CNC 117

- Definition 117
- für Drehmaschinen 304
- für Messmaschinen 361
- für Sägemaschinen 325
- für Schleifmaschinen 309
- Grundfunktionen 117
- offene 173
- Preisentwicklung 178
- Software 117
- Sonderfunktionen 123
- Werkzeugmaschinen 285

CNC-Bedienoberfläche 164
 CNC-Hochsprachenprogrammierung 600
 CNC-Programmierplätze 610
 CO₂-Laser 326
 Computer Aided Engineering 704
 Computer und NC 50
 Containermanagement 763
 Cutter Location Data (CLDATA) 613
 Cyber-Physical Systems (CPS) 728, 761

D

D-Regler 225
 Datenanreicherung 733
 Datenbus 189
 Dateneingabe 55
 Datenkommunikation mit CNC-Steuerungen 669
 Datenmodelle 633
 Datenschnittstellen 119
 Datenumwandlung 150
 Daten und Schnittstellen 644
 Diagnosefunktion 248
 Diagnose-Software 119
 Dialogführung 305
 Diamant 480
 Diamantrollenabrichtgerät 311
 Differentialregler 223
 DIGILOG-Messtaster 548
 Digitale Fertigung 711
 Digitale intelligente Antriebstechnik 221
 Digitale Produktentwicklung 707
 Digitale Regelung 220
 Digitaler Zwilling 391, 741, 748f.
 Digitalisierte Fertigung 52
 Digitalisierung 737, 739
 Digital Light Processing Chip (DLP-Chip) 383
 Digital Light Processing (DLP) 384
 Dimensionierung von Antrieben 261
 DIN 66025 564
 DIN 66217 68
 Diodenlaser 329
 Direct energy deposition powder by laser 389
 Direct energy deposition wire by laser 390
 Direktantriebe 242
 direktes Messsystem 248
 Direktes Metall-Lasersintern 376
 DNC - Direct Numerical Control 667
 DNC - Distributed Numerical Control 55

DNC-Schnittstelle 126
 DNC-System 52
 Doppelgreifer 106
 Doppelspindel-Bearbeitungszentren 289
 Drahtelektrode 340
 Dreh-Fräsen 621
 Dreh-Fräszentren 347, 481
 Drehgeber 73, 75
 Drehmaschinen 298
 Drehmoment 253, 264
 Dreh-Schleifzentren 353
 Drehspindel 277
 Drehstrom Synchronmotoren 257
 Dreh-Wälzfräszentren 353
 Drehzahlen 253
 Drehzahlregelung 228
 Drehzahlvorsteuerung 97
 Drehzahlwechsel 113
 Drehzentrum 350
 Drehzyklen 571
 3D-Bearbeitung 630
 3D-Drucken (Binder Jetting) 380
 3D-Messmaschine 360
 3D-Modelle 636
 3D-Printing 374
 3D-Scannen 374
 3D-Simulation 596
 3D-Werkzeug-Radiuskorrektur 156
 3-Finger-Regel 68
 Dry Run 129
 Durchhangfehlerkompensation 91
 DXF 509, 594, 633
 DXF-Dateien 613
 DXF-Konverter 594
 Dynamische Vorsteuerung 88

E

Ebenen- Auftrag (PBF, MJ, BJ) 391
 EBM (Electron Beam Melting) 377
 EB-Schweißen 344
 Eckenverzögerung 141
 EDGE-Computing 743
 Effektivmoment 265
 Effektor 442
 Einbaumotoren 271
 Einfahren neuer Programme 656
 Einfluss der CNC 207
 Eingabegrafik 623
 Einrichtfunktionen 129
 Einsatz der CNC-Werkzeugmaschinen 56

Einstechschleifprozess 313
 einstellbare Werkzeuge 486
 Einzelsatzbetrieb 129
 Electron Beam Melting (EBM) 377
 Electronic-Key-System 172
 Elektronenstrahl-Maschinen 342
 elektronischer Gewichtsausgleich 88, 98
 elektronische Schüsselsysteme 171
 elektronische Werkzeug-Identifikation 518
 Energiebilanz 464
 Energieeffizienz 119, 461
 Energiemanagement 766
 Energieverbrauch 463
 Erodiermaschine 340
 ERP 676, 732
 ERP-Lösung 517
 Erzeugungsrad 321
 Ethernet 246, 674
 ETHERNET 192
 Evolvente 314

F

F-Adresse 113
 Fabriknetz 404
 Fahrabweisungen 562
 Fahrständerbauweise 287, 289
 Fahrständermaschine 324
 Faserlaser 329
 Feature-Technik 637
 Feinbearbeitung von Bohrungen 486
 Feinverstellköpfe 488
 Feldbus 189
 Feldschwäcbereich 256
 FEM-Berechnung 371
 Ferndiagnose 158
 Fernzugriff 162
 Fertigungsflexibilität 427
 Fertigungsplanung 433
 Fertigungsprinzipien 408
 Fertigungssimulation 647
 Fertigungssystem (FFS) 111
 FFS-Leitrechner 420
 Flachbettdrehmaschinen 298
 Flachsleifmaschine 306
 flexible Bearbeitungszelle 335
 flexible Fertigungslinien 402
 flexible Fertigungssysteme 395
 flexible Fertigungszellen 111, 398
 Flurförderzeuge 415
 Flüssigkeitskühlung 274

Formfräsen 315
 Formschleifen 315
 Formverfahren 315
 FRAME 141
 Fräs-Dreh-Bearbeitungszentrum 347
 Fräserradiuskorrektur 593
 Fräs-Laserzentrum 351
 Fräsmaschinen 209, 285
 Frässpindel 481
 Fräszyklen 571
 Freiformflächen 630
 Freischneiden 119
 Frequenzrichter 226, 230, 253
 Führungen 210, 306
 5-Achs-Maschinen 290
 5-Seiten-Bearbeitung 293
 Funkenerosionsmaschinen 339
 Funktionen der NC 117
 FUP - Funktionsplan 195
 Fused Deposition Modeling (FDM) 380
 Fused Layer Modeling (FLM) 381

G

G54 ... sG57 586
 Gantry-Achsen 69
 Gantrybauweise 285
 Gateway 693
 generative Fertigungsverfahren 367, 374
 Geometriedaten 297
 geometrische Zuverlässigkeit eines
 Werkzeugs 474
 Gewindebohren 144
 Gewindebohren ohne Ausgleichsfutter 144
 Gewindefräsen 144, 490
 Gewindeschneiden 305
 G-Funktionen 567
 G-Funktionen nach DIN 66025, Bl. 2 568
 Gleichrichter 227
 Gleichstrom-Servomotoren 239
 Gleitführungen 210
 Greifer 442
 Greifer-Wechselsysteme 444

H

Hakenmaschine 212
 Handeingabe 120
 Handhabung 439
 Handshake 695
 Hardware 42

Hardware-Schnittstellen 694
 Hartfeinbearbeitung 319
 Hartfeinbearbeitungsmaschine 314
 Hart-Zerspanung 297
 Hauptantriebe 255
 Hauptsätze 563
 Hauptspindel 271
 Hauptspindelantriebe 253, 266
 High-Performance-Cutting 297
 High Speed Cutting (HSC) 275, 481
 Hilfsachsen 148
 Hilfsgrafik 623
 HMI (Human Machine Interface) 168
 Hobelkamm 316
 Hochgantrybauweise 287
 Hochgeschwindigkeits-Bearbeitungszentrum
 296
 Hochleistungsbearbeitung 297
 Hochsprachenelemente 120
 Hohlschaftkegel 274, 481
 Honen 319
 HPC 297
 HSC 481, 615
 HSC-Bearbeitung 489
 HSK-Aufnahmen 482
 HUB 732
 Hüllschnittverfahren 315
 Human-Machine-Interface 403
 hybride Werkzeugmaschine 356
 Hydraulik 464

I

IGES 370, 634
 Inbetriebnahme 248
 indirektes Messsystem 248
 Indirektes-Metall-Lasersintern 378
 Industrial Ethernet 192
 Industrie 4.0 719, 737, 759
 Industrieroboter 110, 439 f., 442
 - Aufbau 440
 - Einsatzkriterien 456
 Informationen 683
 inkrementale Messung 80
 Innengewindefräsen 490
 In-Prozess-Messen 146
 Integrierte Simulations-Systeme 656
 integrierte Werkzeugkataloge 510
 Interdisziplinarität 724
 Internet der Dinge 725, 761
 Interpolation 147, 253

Interpolator 44
I-Regler 223

J

JT-Modell 638

K

Kalkulation 764
Kanalstruktur 145
Kantentaster 585
Karussell-Drehmaschine 324
Kassettenmagazine 105
Kegelräder 320
Kegelradfräsmaschinen 321
Kegelradherstellung 314
Kegelreinigung 274
Keramik 480
Kettenmagazin 105
Kippmoment 256
Kollisionserkennung, automatische 655
Kollisionüberwachung, dynamische 130
Kollisionsvermeidung 127
Kompensation 88
– beschleunigungsabhängiger Positions-
abweichungen 99
– dynamischer Abweichungen 88, 98
– von Durchhang- und Winkligkeitsfehlern
88
Komplettbearbeitung 351
Komplettwerkzeuge 476, 510
Komponenten eines Werkzeug-
Identifikationssystems 522
Konsolbettbauweise 286
Konsolständerbauweise 286, 288 f.
Koordinatenachsen 68
Koordinatentransformation 348
KOP - Kontaktplan 195
Körperschallaufnehmer 312
Körperschallmessung 313
Korrekturwerte 121
Korrekturwerttabelle 293
Kosten und Wirtschaftlichkeit von DNC 679
Kreissägen 325
Kreisverstärkung 225
Kreuzbettbauweise 288
Kreuzgittermessgerät 78
Kreuztischbauweise 286, 288
Kugelgewindetriebe 73, 238
Kühlmittel 213

Kühlmittelzufuhr an den Fräser 274
Kühlung/Schmierung 474
Künstliche Intelligenz 723
Künstliche Intelligenz (KI) 40
Kurzklemmhalter 487
K_v-Faktor 71, 225, 238, 248, 250, 268

L

Laderoboter 304
Lageregelkreis 70, 72, 210, 219, 248
Lageregelung 71
Lageregler 71
Lagersysteme 518
Laminated Object Manufacturing (LOM) 385
Langdrehmaschinen 299
Längenmessgeräte 74, 78
Längenmesssystem 237
LAN - Local Area Networks 683
Laserauftragschweißen 385
laserbasierte Strahlschmelzverfahren 377
Laserbearbeitungsanlagen 326
Laserbearbeitungsköpfe 330
Laserbearbeitungsmaschine 336
Lasersintern 384
Lasersintern (LS) 376, 378
Lattice-Optimierung 372
Leistungsteile 235, 446
Lichtleitfaser 330
Linearantriebe 245
Linearinterpolation 152
Linearmagazine 105
Linearmaßstab 248
Linearmotoren 84, 242, 244
Linear- oder Geradeninterpolation 45
Logbuch 675
Look-Ahead-Funktion 297
Losekompensation 88

M

Makros 121
Mantelfläche 483
manuelle Betriebsart 134
Maschinenauswahl 410
Maschinendatenerfassung 158
Maschinendatenerfassung (MDE) 745
Maschinengestelle 209
Maschinenmodell 651
Maschinennullpunkt 584
Maschinen-Parameterwerte 44

maschinenseitige Aufnahmen 481
 Maschinenverkleidung 212
 Masken-Sintern (MS) 384
 Maßstabfaktor 145
 Maßstabfehler-Kompensation 146
 Master-Slave-Verfahren 690
 Materialanforderung 761
 Material extrusion 390
 Materialise E-Stage 384
 Material jetting 390
 MDE/BDE 681
 Mehr-Achsen Auftrag (DED, EXT) 391
 Mehrfach-Spannbrücke 293
 Mehrmaschinenbedienung 742
 Mehrspindelautomaten 299
 MES (Manufacturing Execution System)
 732
 MES Pyramide 406
 Messen und Prüfen 358
 Messgeber 248
 messgesteuertes Schleifen 313
 Messköpfe 539
 Messmaschinen 358
 Messprotokoll 360, 536
 Messsteuergeräte 313
 Messsystem, direktes 466
 Messsystem, indirektes 237
 Messtaster 147, 358, 361, 529, 585
 Messuhr 585
 Messzyklen 146, 358, 535, 585
 Minimalmengenschmierung 273
 Mobile Computing 724
 Mockup 709
 modulare Werkzeugsysteme 485
 Montageroboter 443
 Motor 235, 239
 Motorgeber 237, 240
 Motorspindeln 256, 260, 272
 MT Connect 176
 Multitasking Bearbeitung 621
 Multitasking-Bearbeitung 148
 Multitasking-Maschinen 346
 Multi-Touch-Bedienung 166

N

Nachlauffehler 72, 155
 Nano- und Pico-Interpolation 147
 NC-Achsen 46
 NC-Hilfsachsen 148
 NC-Kern, virtueller 155

NC-Programm 42, 52, 561
 NC-Programmiersysteme 629
 NC-Programmierung 51, 607
 NC-Programm und Programmierung 52
 NC-Programmverwaltung 675
 NC-Simulation 654
 Nd:YAG-Laser 327
 Nesting 391
 Netzwerktechnik für DNC 672
 Nibbel-Prinzip 334
 Nick und Gear-Kompensation 88
 Nullpunkte 531, 571, 573
 Nullpunktverschiebung 541, 585
 NURBS 149, 297

O

OEE 752
 Offene Steuerungen 173
 Offenheit einer CNC 173
 Offset 121
 Öl-/Luft-Schmierung 274
 OPC UA 176, 189
 Open System Architecture 174
 Optimierte CNC-Drehbearbeitung 620
 Optimierte CNC-Frässtrategien 615
 Overall Equipment Effectiveness (OEE) 752

P

Palette 110
 Palettenpool 111
 Palettenspeicher 111
 Paletten-Umlaufsysteme 414
 Palettenverwaltung 149, 742
 Palettenwechsel 290
 Parallel-Achsen 69
 Parallelkinematik 209
 Parametrierung 228
 PDM (Product Data Management/Produkt-
 datenmanagement) 706, 710
 PDM-Systeme 704
 Pick-Up-Drehmaschinen 298
 Pick-up-Verfahren 110, 314
 PID-Regler 224
 Planung eines Flexiblen Fertigungssystems
 407
 Planung flexibler Fertigungssysteme 433
 Planungsphase in der Serienfertigung 659
 Platzcodierung 108
 - variable 109, 118

PLM (Product Lifecycle Management) 701, 707
 PMI (Product Manufacturing Information) 703
 Pneumatik 464
 Polarkoordinaten 121
 Portalfräsmaschinen 287
 Portalroboter 402
 Portal-Tischbauweise 287
 Position setzen 121
 Positionsregelung 219
 Postprozessor 53, 294, 643, 648
 Postprozessoren (PP) 613
 Postprozessor und Simulation 391
 Powder bed fusion by electron beam 389
 Powder bed fusion by laser 389
 Preisbetrachtung 178
 Prismen-Aufnahme 483
 Probelauf 129
 Product Data Management 706, 710
 Product Lifecycle Management 707, 711
 Produktbaukasten 319
 Produktdatenmanagement 710
 Produktionsleitsysteme 395
 Produktionsnetzwerk 404
 Produktionsplanungssysteme 432
 Produktionsprozess 659
 Produkt-Lebenszyklusverwaltung 707
 Profilieren von Schleifscheiben 312
 Profilschleifen 319
 Profilschleifmaschine 311
 PROFINET 189
 Programmänderung im laufenden Betrieb 658
 Programmaufbau, Syntax und Semantik 563
 Programmgenerierung, automatische 451
 Programmieren von Drehmaschinen 305
 Programmieren von Messmaschinen 360
 Programmieren von Robotern 445, 449
 Programmieren von Schleifprozessen 311
 Programmiermethoden 607
 Programmier-Software 123
 Programmiersysteme 290, 312, 625
 Programmierung 52, 290
 - werkstatorientierte 290, 305
 Programmierung für die generative Fertigung 614
 Programmnullpunkt 584
 Programmtest 121, 129
 Programmverwaltung 675
 Proportionalregler 223

Protokoll 691
 prozessnahe Messung 532
 Prozessregelung 529
 Prozesssteuerung 763
 Prüfschärfensteuerung 766
 Pulsweiten-Modulation 230
 Punktsteuerungen 44

Q

Quadrantenfehler-Kompensation 88, 90

R

Rahmenständerbauweise 289
 Rapid Manufacturing 369
 Rapid Prototyping 368, 709
 Rapid-Technologien 368
 Rapid Tooling 369
 Rattern 98
 Ratterunterdrückung 98
 Räumen 315
 Rechnereinheit 445
 Referenzpunkt 573
 Regeldifferenz 250
 Regelkreis 84
 Regelung 217
 Regelungstechnik 217
 Reglertypen 223
 Reibkompensation 88, 90
 Relativmaße 566
 Reset 121
 Revolver 104, 301, 483, 587
 RFID 518
 Roboter 110
 Roboterarm 442
 Robotersteuerung 444
 Rohrbiegemaschinen 338
 Rollenförderer 415
 rotierende Werkzeuge 476, 481
 Ruckbegrenzung (Slope) 122
 Rückzugsbolzen 481
 Rund- oder Schwenkachsen 69

S

Sachmerkmalleiste 477
 Safe Handling 447
 Safe Operation 447
 Safe Robot Technology 447
 Sägemaschinen 324

- Satz ausblenden 122
- Satz Vorlauf 122
- Säulenbohrmaschinen 322
- Scannen auf Messmaschinen 361
- Schaeffler 754
- Schälrad 316
- Schaltsbefehle 42
- Schaltsbefehle (M-Funktionen) 564
- Schaltfunktionen 103, 562
- Scheibenlaser 328
- Scheinleistung 467
- Schleifbänder 308
- Schleifen 275
 - unrunder Formen 312
- Schleifmaschinen 209, 305
- Schleifscheiben 308
- Schleifschnecken 320
- Schleifspindeln 276, 347
- Schleifwerkzeuge 308
- Schleifzyklen 312
- Schleppabstand 71
- Schleppfehler 71, 155
- Schleppfehler-Kompensation 97
- Schmelzschnneiden 330
- Schneiderodieren 340
- Schneidplatten 477
- Schneidrad 316
- Schneidstoff 479
- Schnittdaten 474
- Schnittgeschwindigkeit 296, 304, 474
- Schnittstellen 694
- Schnittwerte 511
- Schrägbett Drehmaschinen 298
- Schrägverzahnung 316f.
- Schrittmotoren 239
- Schutzbereiche 129
- Schwenkachsen 294
- Schwenkbarer Drehtisch 293
- Selective Laser Melting 376
- selektive Laserstrahlschmelzen 369
- Selektives Lasersintern (SLS) 378
- Semi Closed Loop 83
- Semi-Closed-Loop-Betrieb 77
- Senkerodieren 340f.
- Sensoren 451
- SERCOS interface 246
- Servoantriebe 464
- Servomotor 235, 237, 239
- Shiften 318
- Sicherheitsfunktionen bei Robotern 447
- Sicherheitskonzepte, integrierte 136
- Sicherheitstechnik 136
- Simulation 122, 128f., 642, 647, 660, 708
 - der Bearbeitung 290
 - des Bearbeitungsablaufs 715
- Simulationsgrafik 623f.
- Simulation von FFS 428
- Simultandrehen 148
- Sinterverfahren 374
- Slice-Prozess 370
- Smart Data 162
- Smarte Objekte 724
- Smart Factory 730, 759
- Software 43
- Software-Schnittstelle 123, 697
- Sonderwerkzeuge 492
- Späneförderer 213
- Spannfutter 276
- Spannmittel 651
- Spannvorrichtungen 411
- speicherprogrammierbare Anpassteuerung 117
- speicherprogrammierbare Steuerung 185
- Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) 185
- Sperrluft 274
- Spiegeln, Drehen, Verschieben 122
- Spindeltriebe 297
- Spindeldrehzahl 113
- Spindelmesstaster 537, 539f.
- Spindelsteigungsfehlerkompensation 88, 249
- Spindelsteigungskompensation 89
- Spline 149, 152
- Spline-Interpolation 149, 152
- Splines 297
- Sprachumschaltung 153
- Sprungantwort 217
- SPS 173, 178, 185, 202
- SPS, PLC 49
- Stangenbearbeitungszentrum 347
- Stanzkopf 335
- Stanz-Laser-Maschine 336
- Stanz- und Nibbelmaschinen 333
- stehende Werkzeuge 476, 482
- Steigungsfehler 74
- Steilkegel 481
- Steilkegelaufnahmen 274
- STEP 370, 633f.
- STEP (ISO/IEC 10303) 152
- Stereolithografie 382
- Sternrevolver 483

Steuerungen, offene 173
 Steuerungsarten 44
 Steuerungsnachbildung 648
 Stirnräder 314
 Stirnseitenbearbeitung 349
 STL 370
 STL-Format 370
 Strahlführung 330
 Strahlquellen 326
 Strahlschmelzen 375, 378
 Streckensteuerungen 44
 Struktur der NC-Programme 562
 Stützensgenerator 384
 Stützgeometrien 392
 Sublimierschneiden 330
 Swiss type Lathe 299
 Synchron-Linearmotoren 242
 Synchronmotoren 257f.
 Synchron-Servoantriebe 239
 Synchron-Servomotor 231, 239
 Systemdiagnosen 124

T

Tapping-Center 323
 Taster, messender 361
 Tastkopf 360
 Tauchfräsen (Plunging) 615
 TCP/IP 189
 Technologische Informationen 562
 Teileprogramme 117
 Teilverfahren 315
 Temperaturfehler-Kompensation 118
 Temperaturkompensation 88, 92
 Tiefbohrmaschinen 323
 Token Passing 690
 Token-Prinzip 690
 Topologie-Optimierung 371
 Torquemotoren 84
 Touchbedientafeln 170
 Touch-Bedienung 166
 Touch Panels 166
 Trägheitsmoment 238
 Transferstraßen 401
 Transformation 588
 Transportsysteme 414
 trochoidale Bearbeitung 615
 Trockenbearbeitung 213, 296, 319
 Trockenlauf 129

U

Übertragungsgeschwindigkeit 691
 Übertragung von Daten 182
 Umkehrspanne 72
 Umlenkspiegel 330
 Umschlingungswinkel 615
 Universal-Rundschleifmaschine 306
 Universelle NC-Programmiersysteme 612
 Unterprogramme 122

V

V.24-Schnittstelle 695
 VDI-Halter 482
 Verschleißkompensation 487
 Verstellkopf 488
 Vertikaldrehmaschinen 298
 Vertikalmaschinen 285
 Verzahnmaschinen 209, 314
 Verzahnverfahren 315
 Vierquadrantenbetrieb 228
 Virtualisierung 724
 Virtuelle Maschine 650
 Voll Hartmetall 480
 Volumenkompensation (VCS) 88, 92
 Voreinstellgeräte 513
 Vorschub 474
 Vorschubantriebe 71, 235, 237, 257, 306
 Vorschubbegrenzung 155
 Vorschubgeschwindigkeit 113
 Vorsteuerung 155, 226

W

Wälzfräsen 315
 - von Zahnrädern 316
 Wälzfräser 316
 Wälzfräsmaschinen 314, 317f.
 Wälzführungen 210
 Wälzhobeln 316
 Wälz- oder Hülschnittverfahren 315
 Wälzschleifen 315
 Wälzstoßen 315f.
 Wartung 767
 Wasserstrahl-Schneidmaschinen 344
 Wechselrichter 227, 236
 Wegbedingungen 567
 Weginformationen 67, 562, 566
 Weichvorbearbeitung 316
 Weltwirtschaftskrise 2009 30

- Wendeplatten 477, 480
 - Wendeschneidplatten-Feinverstellung 487
 - Wendespanner 293
 - Werkrad 321
 - Werkstatororientierte Programmierung (WOP) 51
 - Werkstatororientierte Programmierung (WOP) 608
 - Werkstückmesstaster 530
 - Werkstückmessung 529
 - Werkstücknullpunkt 584
 - Werkstücktransportsysteme 411
 - Werkstück- und Werkzeugwechsel 314
 - Werkstückwechsel 109, 290
 - Werkstück-Wechseleinrichtung 290
 - Werkzeugaufnahmen 273, 500
 - Werkzeugausgabe 764
 - Werkzeugblatt 506
 - Werkzeugbruch-Kontrolle 305
 - Werkzeugbruch- und Standzeitüberwachung 118
 - Werkzeuge 473, 641, 652
 - angetriebene 108, 119
 - Werkzeugidentifikation 108, 505
 - Werkzeugklassifikation 478, 507
 - Werkzeugkomponenten 508
 - Werkzeugkorrektur 541, 592, 765
 - Werkzeugkorrektur, 3-D 156
 - Werkzeugkorrekturwerte 304
 - Werkzeuglängenkorrektur 592
 - Werkzeuglängenmessung 124
 - Werkzeuglisten 511
 - Werkzeuglogistik 514
 - Werkzeugmaschine 159
 - Werkzeugradiuskorrektur 592
 - Werkzeugrevolver 104, 483
 - Werkzeugschleifmaschine 306, 314
 - Werkzeugspeicher 290
 - Werkzeug-Standzeitüberwachung 305
 - Werkzeugträgerbezugspunkt 587
 - Werkzeugverwaltung (Tool Management) 293, 501
 - Werkzeugvoreinstellung 512
 - Werkzeugwechsel 104, 106, 131
 - Werkzeugwechsellpunkt 587
 - Werkzeugwechsler 464
 - Wiederanfahren an die Kontur 122
 - Winkelkopf 485
 - Winkligkeitsfehlerkompensation 91
 - Wirbelfräsen (Trochoidales Fräsen) 143, 615
 - Wirkleistung 467
 - WLAN - Wireless Local Area Network 673
 - WOP - Werkstatororientierte Programmierung 290, 305
 - Wuchtausgleich, dynamischer 489
- Z**
- Zirkular- oder Kreisinterpolation 46
 - Zustandsüberwachung 158
 - Zustellung 474
 - Zwischenkreis 235
 - Zwischenkreisspannung 256
 - Zyklen 324, 570
 - Zylindermantelflächen 293