



Technische Information

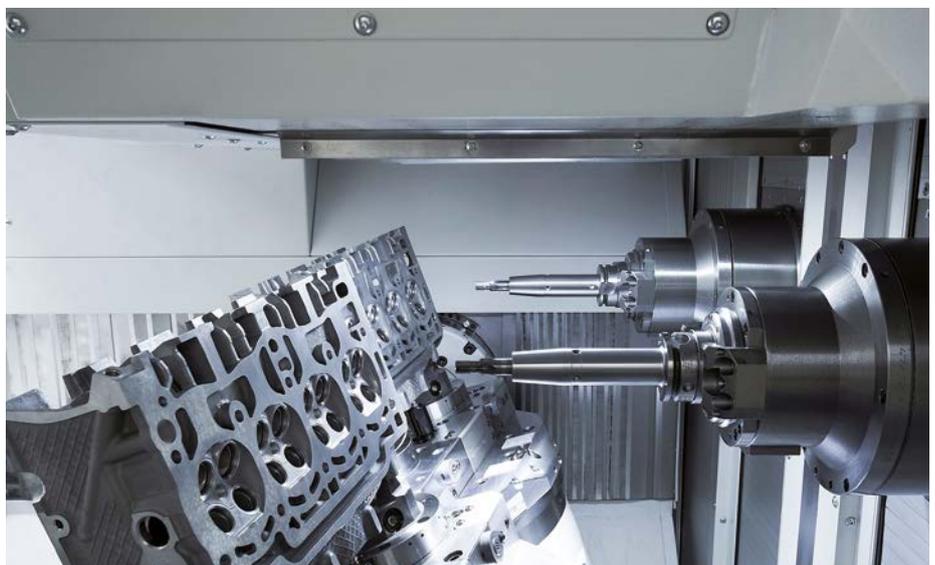
## Höhere Genauigkeit für Bearbeitungszentren in der automatisierten Großserienfertigung

Automobilkäufer fordern – in Abhängigkeit verschiedenster Randbedingungen – unterschiedliche Fahrzeugtypen sowie Motorisierungen. So fragen sie beispielsweise abhängig von Kraftstoffkosten, Abgasnormen oder steuerlichen Maßnahmen in den einzelnen Märkten andere Fahrzeuggrößen, Motortypen und Motorleistungen nach. Für die Automobilhersteller erschwert dies die Abschätzung des Stückzahlverlaufs bzw. die Kapazitätsplanung und die Auslegung einer Produktionslinie.

Um den Kundenwünschen gerecht zu werden, bieten die Fahrzeughersteller unter anderem Motoren gleicher Zylinderzahl in verschiedenen Leistungsklassen an. Dies hat zusätzlich eine Steigerung der Variantenzahl zur Folge. Die kürzer werdenden Produktlebenszyklen der Fahrzeuge sowie die volatilen Märkte führen somit zu veränderten Herausforderungen an die Produktion der Automobilhersteller [1]. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, werden die klassischen Merkmale der Produktion wie Qualität, Zeit und Kosten um den Aspekt der Flexibilität erweitert.

Für die Produktionslinien zur mechanischen Bearbeitung der Antriebstrangkomponenten von Fahrzeugen (Motor-, Getriebe- und Achskomponenten) bedeutet dies den Weggang von klassischen Transferstraßen mit starrer Taktung und hoher Produktivität hin zu Linien mit verketteten Bearbeitungszentren und gesteigerter Flexibilität. Neben der Herausforderung, flexibel auf Nachfrageschwankungen der Absatzmärkte für Fahrzeuge reagieren zu können, wird es außerdem zukünftig weiter steigende Anforderungen bezüglich des Schadstoffausstoßes sowie des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen seitens der Gesetzgeber und Endkunden geben. Ein Ansatz, dem zu begegnen, besteht darin, die Reibung im Antriebsstrang zu reduzieren, voraus für die zu fertigenden Bauteile meist gesteigerte Qualitätsanforderungen resultieren.

Die in den Fertigungslinien eingesetzten verketteten Bearbeitungszentren haben die Aufgabe, die Forderungen der Produzenten auch bei großen Stückzahlen prozesssicher umzusetzen (vgl. Abbildung 1). Der Einsatz von Längenmessgeräten in Closed Loop-Regelung in den Vorschubachsen der Bearbeitungszentren trägt dazu bei, diese vielfältigen Anforderungen zu erfüllen.



# Von der Transferstraße zu verketteten Bearbeitungszentren

## Mehr Flexibilität bei Varianten, Maschinen und Kapazitäten

### Transferstraßen sind wenig anpassungsfähig

Da die einzelnen Stationen einer Transferstraße speziell auf die Bearbeitung eines spezifischen Werkstücks ausgelegt werden, kann die starr verkettete Linie nicht einfach um zusätzliche Stationen erweitert werden. Um den geplanten maximalen Kapazitätsbedarf bereitstellen zu können ist daher bereits zum Start der Produktion (SOP) der überwiegende Teil des Invests der Produktionslinie zu tätigen. Da die Stückzahlen zu Beginn der Produktion langsam ansteigen (Linienanlauf) bzw. am Ende des Produktlebens abfallen (Linienauslauf), ergibt sich ein Überangebot an Fertigungskapazität (Abbildung 2). Dies bedeutet, die installierte Kapazität wird nicht voll ausgeschöpft.

Zusätzliche Herausforderungen ergeben sich, wenn der Kapazitätsbedarf während des Regelbetriebs der Transferstraße größer ausfallen sollte als ursprünglich geplant, da die dann vom Markt geforderten Werkstücke nicht mehr mittels der installierten Linienkapazität produziert werden können. Die Duplikation einer Transferstraße zum Abfangen dieser Stückzahlspitzen würde jedoch zu einer deutlichen Überkapazität führen.

### Flexibilität durch verkettete Bearbeitungszentren

Durch den Einsatz verketteter Bearbeitungszentren (BAZ) können Fertigungslinien mit kleinerem Kapazitätsangebot installiert werden. Mit ihnen ist ein größeres Spektrum an Fertigungsaufgaben und damit eine höhere Produktionsflexibilität verbunden. Die Anpassung an den realen Stückzahlbedarf bei Linienanlauf kann dann beispielsweise erfolgen, indem in die bestehende Produktionslinie an freigehaltenen Stellplätzen zusätzliche Bearbeitungszentren eingebunden werden oder die gesamte Linie dupliziert wird.

Diese Annäherung des Kapazitätsangebots an den Kapazitätsbedarf verfolgt das Ziel einer möglichst wirtschaftlichen Vergrößerung des Fertigungssystems [2]. Daher geht der Trend in der Großserienfertigung von Antriebsstrangkomponenten für Fahrzeuge weg von Transferstraßen hin zu Bearbeitungs- oder Transferzentren [3].

Die gesteigerte Flexibilität verketteter Bearbeitungszentren bezieht sich auf die möglichst schnelle und kostengünstige Reaktion auf Nachfrageschwankungen. So wird beispielsweise angestrebt, verschiedene Varianten eines Werkstücks ohne Umrüstaufwände auf der gleichen Fertigungslinie bearbeiten zu können (**Varianten-Flexibilität**).

Ein weiterer Ansatz betrifft die vereinfachte Erweiterung einer Produktionslinie um zusätzliche Maschinen. Dies kann als **Re-Use-Flexibilität** bezeichnet werden, da der Einsatz von Standardmaschinen sowie deren einheitliche Verkettung eine vereinfachte Integration und Wiederverwendung der Maschinen in anderen Fertigungslinien ermöglichen.

Erfolgt die Betrachtung der Linienkapazität über die Lebensdauer eines zu fertigenden Werkstücks, so führen die beschriebenen Nachfrageschwankungen letztendlich zu Differenzen zwischen dem Kapazitätsbedarf und dem Kapazitätsangebot der Fertigungslinie. Während mit Transferstraßen nur vergleichsweise große Sprünge bei der Produktionskapazität realisiert werden können, eignen sich Fertigungslinien mit verketteten Bearbeitungszentren für eine kleinstufige Erhöhung der Kapazität bei Produktionsanlauf. Weiterhin können sie aufgrund ihrer höheren Flexibilität auch bei Produktauslauf wieder zurückgebaut werden [4]. Abbildung 2 stellt den stufenweisen Invest im Rahmen der Anlaufphase eines zu produzierenden Werkstücks sowie den in der Auslaufphase erfolgenden Rückbau dar (**Stückzahl-Flexibilität**).

Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Layout einer Fertigungslinie für die mechanische Bearbeitung eines Powertrain-Bauteils. Zu erkennen sind die durch Portallader verketteten Bearbeitungszentren. Diese sind wiederum zu einzelnen Bearbeitungsoperationen gruppiert. Eine Bearbeitungsoperation setzt sich somit aus mehreren Bearbeitungszentren zusammen, die parallel mit dem gleichen Arbeitsinhalt betrieben werden.

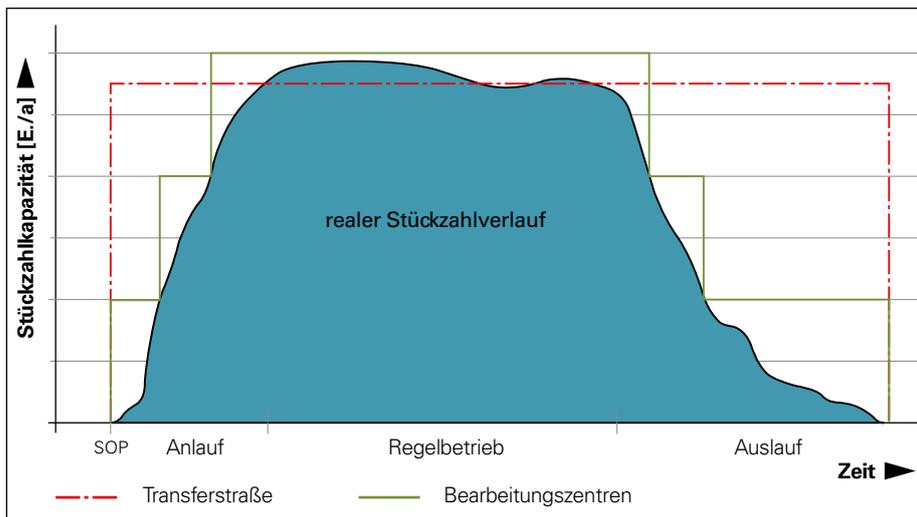


Abbildung 2: Stückzahl-Flexibilität – Kapazitätsangebot vs. Kapazitätsbedarf (nach [4])

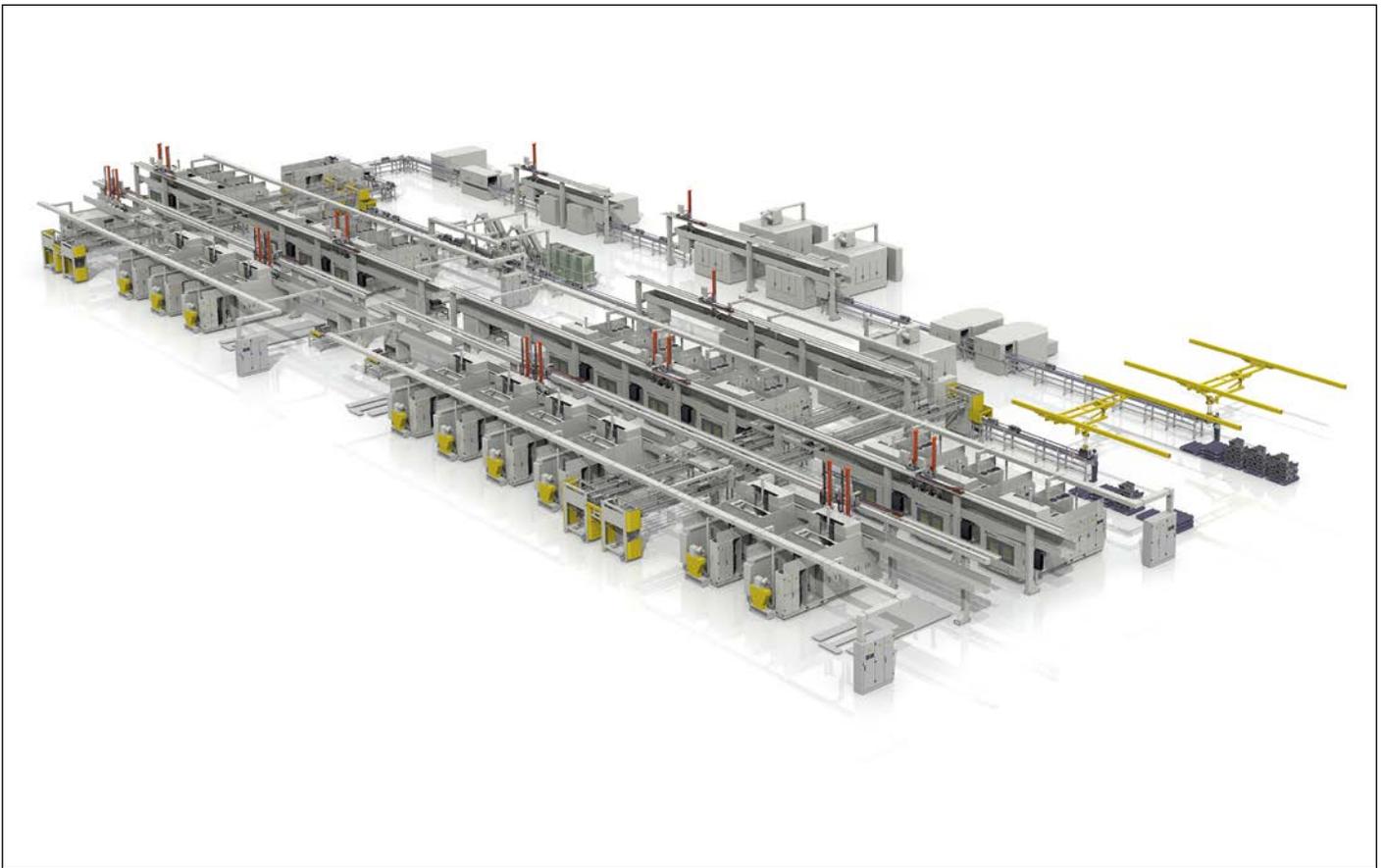


Abbildung 3: Beispiel einer Fertigungsline für die Großserienfertigung (Grafik: MAG IAS GmbH)

### Horizontale Bearbeitungszentren bieten Vorteile

Üblicherweise werden horizontale Bearbeitungszentren für die Produktion eingesetzt. Diese weisen einen günstigen Spänefall auf, wodurch beispielsweise mit geringerer Kühlschmierstoffmenge zum Spülen von Spänen oder auch mit Minimalmengenschmierung gearbeitet werden kann. Weiterhin sind diese Maschinen durch einfache Front- oder Top-Beladung zur Versorgung mit Werkstücken variabel automatisierbar. Dies ermöglicht den Einsatz des gleichen Maschinentyps für verschiedene Fertigungsanlagen, auch wenn unterschiedliche Beladesysteme vorliegen. Aufgrund höherer Produktivität bei nahezu gleicher Aufstellfläche kommen zum Teil auch Doppelspindlermaschinen zum Einsatz (siehe Abbildung 1 auf Seite 1).

### Merkmale der automobilen Großserienfertigung

Zusammenfassend können folgende Merkmale für die spanende Bearbeitung kubischer Werkstücke der automobilen Großserienfertigung festgehalten werden:

- Es besteht eine automatisierte Produktion mit verketteten horizontalen Bearbeitungszentren
- Ein Maschinenbediener betreut acht bis fünfzehn Maschinen
- Eine Bearbeitungsoperation besteht meist aus mehreren baugleichen Bearbeitungszentren, die parallel mit dem gleichen Arbeitsinhalt arbeiten
- Die Bearbeitung eines Werkstücks erfolgt sequentiell über mehrere Bearbeitungsoperationen
- Ein einzelnes Werkstück wird mittels mehrerer Bearbeitungszentren gefertigt. Daher sind mehrere Bearbeitungszentren verantwortlich für die Toleranzhaltigkeit des Werkstücks

Insbesondere der letzte Aufzählungspunkt verdeutlicht, dass die gefertigten Toleranzen eines Werkstücks von den einzelnen Maschinen bzw. den Teilprozessen der gesamten Fertigungsanlage abhängen. Im Vergleich zum Werkzeug- und Formenbau, wo ein Werkstück auf einer Maschine, betreut durch einen Zerspanungsmechaniker, gefertigt wird, ergeben sich in der Großserienfertigung Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fertigungsschritten der Prozesskette. Dies gilt es bei der Auslegung des Prozesses und der Fertigungsline zu beachten.

# Kubische Powertrain-Komponenten

## Bearbeitungsverfahren und Toleranzen

Der Antriebsstrang eines Fahrzeugs lässt sich in die Module Motor, Getriebe und Achsen aufteilen [1]. Diese Module setzen sich wiederum aus weiteren Komponentengruppen wie beispielsweise dem Ventiltrieb und dessen Bauteilen zusammen. Als klassische kubische Bauteile der Powertrain-Fertigung sind u. a. Zylinderkopf, Pleuellagergehäuse sowie Getriebegehäuse zu nennen.

Aufgrund der hohen Stückzahlen und der damit verbundenen Wirtschaftlichkeit werden die Werkstücke vor der mechanischen Bearbeitung üblicherweise endkontournah gefertigt. Das bedeutet, die primäre Geometrie des Werkstücks ist bereits durch den Gießprozess oder auch durch den Schmiedeprozess z. B. bei Pleuel oder Pleuellagergehäuse vorgegeben. Dies spiegelt sich auch in der Verfahrensaufteilung der spanenden Bearbeitung kubischer Werkstücke wider [5, 6].

### Schwerpunkt Bohrbearbeitung

Abbildung 4 zeigt die Verfahrensaufteilung am Beispiel eines Zylinderkopfs. Der Anteil der Fräsbearbeitung ist im Vergleich zu Bohr- oder bohrähnlichen Bearbeitungen klein. Dies ist nachvollziehbar, da die Hauptgeometrie des Werkstücks bis auf wenige Flächen bereits gießtechnisch erzeugt wurde.

Die gewünschten Bohrungen sind in einem solchen Werkstück gießtechnisch jedoch nur mit hohem Aufwand bzw. gar nicht realisierbar. Sie müssen durch Bohroperationen innerhalb der mechanischen Fertigungslinie eingebracht werden, wodurch deren Anteil an den eingesetzten spanenden Fertigungsverfahren deutlich überwiegt.

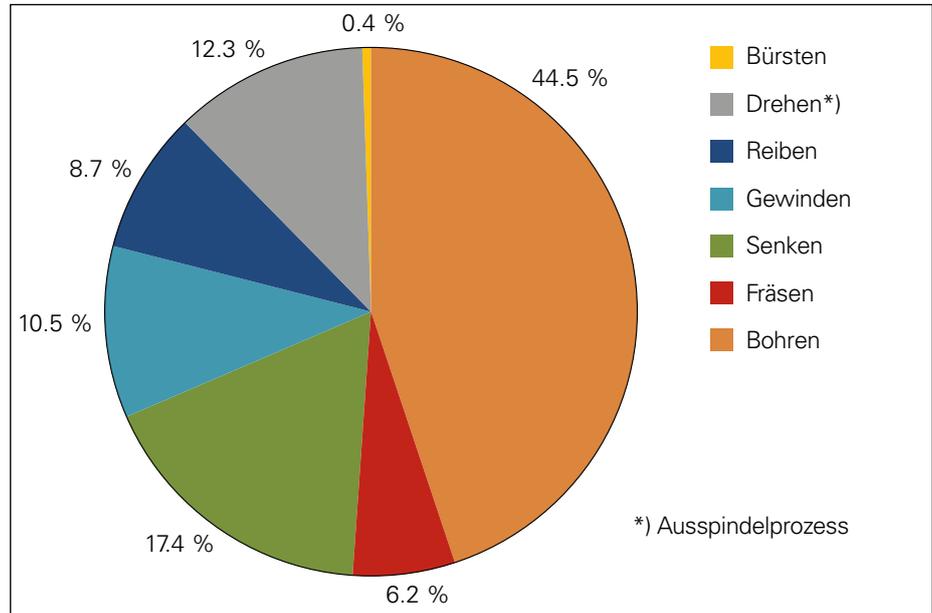


Abbildung 4: Eingesetzte Fertigungsverfahren und deren Anteil an der Herstellung eines Zylinderkopfs (nach [5])

Die dargestellte Verfahrensaufteilung ermöglicht auch Rückschlüsse auf die für die Bearbeitung notwendigen Achsbewegungen. Aufgrund der Bohroperationen besteht der überwiegende Teil der Bewegungen aus der Positionierung des Werkzeugs zum Werkstück sowie einer einachsigen Vorschub- und Rückzugbewegung. Da die Werkstücke üblicherweise keine Freiformflächen besitzen, ist bei den Fräsbearbeitungen neben einer Positionierung die Bewegung in der Ebene über das Verfahren zweier Linearachsen ausreichend.

Die überwiegende Anzahl an Form- und Lagetoleranzen am zu fertigenden Werkstück wird demnach durch die mehrheitlich vorliegenden Bohrbearbeitungen bestimmt. Neben Durchmesser- und Bohrtiefertoleranzen, die primär durch das Maß des Werkzeugs, z. B. einer Reibahle, beeinflusst werden, sind in den Bauteilzeichnungen auch Toleranzangaben zu Position, Abstand und Bohrtiefe zu finden.



Abbildung 5: HEIDENHAIN-Längenmessgerät in einem Horizontalbearbeitungszentrum (Foto: GROB-WERKE GmbH & Co. KG)

### Linearachsen bestimmen Maßhaltigkeit

Die Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen wird unter anderem durch die Fähigkeit der Linearachsen einer Bearbeitungsmaschine zur genauen Positionierung bestimmt (Abbildung 5). Abhängig davon, welches Werkstück bzw. welcher Zeichnungssatz betrachtet wird, können unterschiedliche Toleranzwerte und Toleranzaufteilungen für die Fertigungsfeatures gefunden werden.

Abbildung 6 stellt die Aufteilung der Toleranzen (Positions-, Abstands- und Tiefentoleranzen) für ein ausgewähltes Kurbelgehäuse beispielhaft dar. Für das gewählte Beispiel ist ersichtlich, dass etwas mehr als 30 % der betrachteten Toleranzen  $\leq \pm 0,1$  mm sind. Auch bei Zylinderköpfen oder Getriebegehäusen liegen Fertigungsfeatures vor, für die seitens der Konstrukteure Toleranzen  $\leq \pm 0,1$  mm gefordert werden. Beispielhaft seien hier Positions- und Tiefentoleranzen von Bohrungen im Bereich des Ventiltriebs eines Zylinderkopfes oder auch die Bohrungsachsabstände der Haupt- und Halslagerachsen am Differentialgehäuse genannt.

### Niedrige Toleranzwerte prozesssicher einhalten

Um den zuvor beschriebenen Wunsch nach Flexibilitätssteigerung zu realisieren, besteht das Ziel der Produzenten u. a. darin, Standardmaschinen für die Fertigung einzusetzen. Auf diese Weise müssen sie nicht für einzelne Fertigungsmaße auf zusätzliche Sondermaschinen zurückgreifen. Dies wiederum bedeutet: Auch wenn die Toleranzwerte  $\leq \pm 0,1$  mm betragen, so sind diese dennoch prozesssicher durch die in den Produktionslinien installierten Bearbeitungszentren einzuhalten.

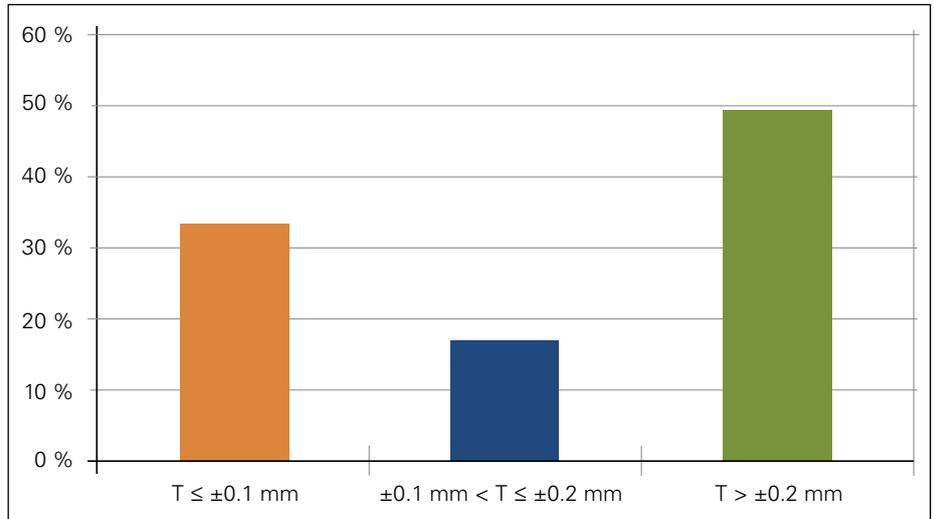


Abbildung 6: Aufteilung der Bereiche für Positions-, Abstands- und Tiefentoleranzen am Beispiel eines Kurbelgehäuses

# Kubische Powertrain-Komponenten

## Fähigkeitsuntersuchungen liefern Kennwerte zur Maschinen- und Prozessfähigkeit

Im Vergleich zu den Anforderungen im Werkzeug- und Formenbau erscheinen die beschriebenen Toleranzwerte eher groß. Zu beachten ist jedoch, dass die Werte für Fahrzeugwerkstücke zunächst einmal den Zeichnungsangaben seitens des Konstrukteurs entsprechen. Um sicher zu gehen, dass die Maschinen bzw. der realisierte Fertigungsprozess fähig sind, die geforderten Zeichnungstoleranzen über einen langen Zeitraum mit definierter Sicherheit zu den Toleranzgrenzen einzuhalten, führen die Automobilproduzenten mit den Bearbeitungszentren statistische Fähigkeitsuntersuchungen durch [7].

### Fähigkeitsuntersuchungen zu Maschine und Prozess

Für die Abnahme der Werkzeugmaschinen werden beispielsweise 50 Werkstücke auf der Anlage bzw. den einzelnen Maschinen produziert. Im Anschluss daran wird die Verteilung der gefertigten Toleranzmaße mit statistischen Methoden ausgewertet. Für die Fähigkeitsuntersuchungen werden sogenannte Fähigkeitskennwerte bzw. Fähigkeitsindizes festgelegt.

Für die Ermittlung der **Maschinenfähigkeit** werden die Indizes  $C_m$  bzw.  $C_{mk}$  definiert, für die Erfassung der **Prozessfähigkeit** die Indizes  $C_p$  bzw.  $C_{pk}$ . Dabei berücksichtigen die Indizes  $C_{mk}$  und  $C_{pk}$  eine nicht zentrierte Verteilung gemessener Toleranzwerte, erfasst an mehreren Bauteilen.

Die Ermittlung der Maschinenfähigkeit dient der Kenntnis des kurzzeitigen Streuverhaltens eines gefertigten Toleranzmaßes durch eine Werkzeugmaschine unter möglichst konstanten Randbedingungen ( $\equiv$  Kurzzeituntersuchung). Die Prozessfähigkeit hat das Ziel das langfristige Streuverhalten einer Maschine unter Prozessbedingungen zu ermitteln ( $\equiv$  Langzeituntersuchung). In [7] können die Gleichungen zur

Berechnung der Indizes, ausgehend von den gemessenen Toleranzwerten an gefertigten Werkstücken, sowie weiterführende Informationen gefunden werden.

Gleichung 1 beschreibt zur weiteren Verwendung die Größen  $C_m$  und  $C_p$ :

$$C_m, C_p = T / (6 \cdot s) \quad (\text{Gleichung 1})$$

$T$  = Toleranzbereich nach Zeichnungsmaß  
 $s$  = Standardabweichung

Der Produzent gibt die Fähigkeitskennwerte für die qualitätsrelevanten Toleranzen vor. Die gelieferten Fertigungsmaschinen des Maschinenherstellers müssen diese bei der Abnahme mindestens erreichen. Bezogen auf den Abnahmeprozess erfolgt durch die Festlegung der Indizes eine weitere Eingrenzung der in der Werkstückzeichnung angegebenen Toleranzwerte. Abbildung 7 verdeutlicht dies am Beispiel der Toleranz  $T = \pm 0,1$  mm unter Berücksichtigung des Maschinenfähigkeitskennwertes  $C_m$ . Die Automobilproduzenten geben zusätzlich Merkmalsklassen für Toleranzen an, die kritisch ( $C_m = 2,00$ ), wichtig ( $C_m = 1,67$ ) oder weniger wichtig ( $C_m = 1,33$ ) bezüglich der Bauteilfunktionalität sind.

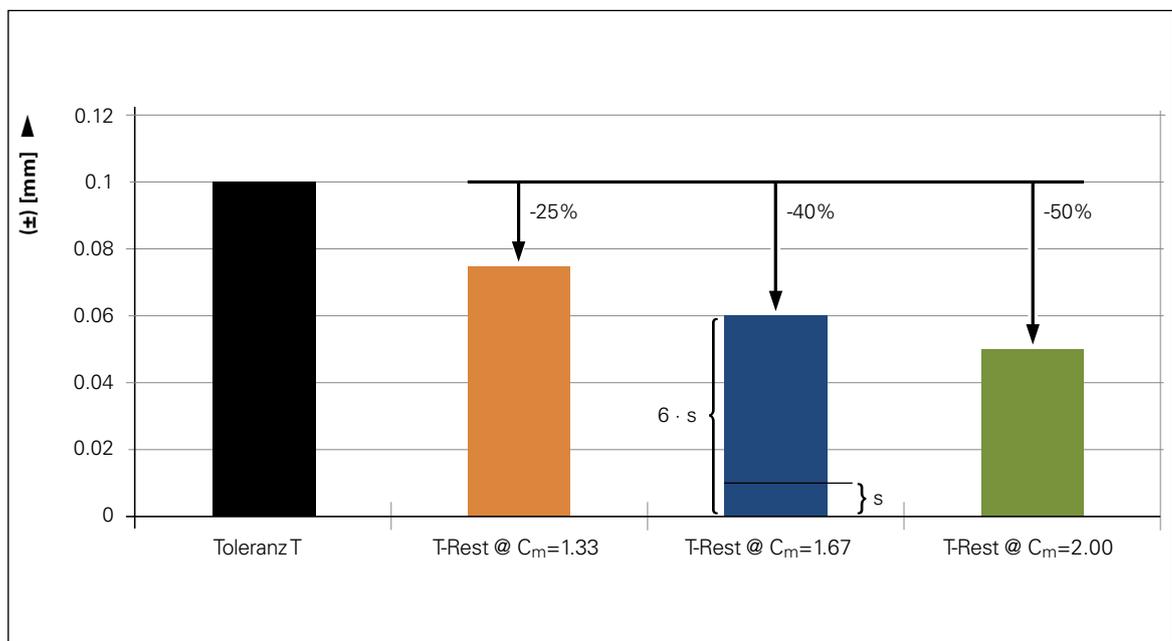


Abbildung 7: Zusammenhang von Zeichnungstoleranzangabe und Fähigkeitsindex  $C_m$

### Ziel: minimale Streuung

Für eine gleichbleibend hohe Werkstückqualität bzw. minimale Ausschussquote besteht das Ziel darin, eine möglichst geringe Streuung der gefertigten Toleranzmaße und damit eine geringe Standardabweichung zu erreichen. Daher kann Gleichung 1 auch wie folgt interpretiert werden:

$$C_{m, \text{gemessen}} = T / (6 \cdot s) \geq C_m \quad (\text{Gleichung 2})$$

bzw.

$$6 \cdot s \leq T / C_m \quad (\text{Gleichung 3})$$

$C_{m, \text{gemessen}}$  entspricht dem Index, der sich aus der Vermessung eines tolerierten Maßes z. B. an 50 während der Maschinenabnahme gefertigter Werkstücke und der darüber berechneten Standardabweichung ergibt.

### Fähigkeitsuntersuchungen prüfen die Einhaltung der maximal akzeptierten Streuung

Aus Gleichung 2 ist ersichtlich, dass der aus den Messungen resultierende Fähigkeitsindex größer wird, je kleiner die Standardabweichung ist. Dieser aus den Messungen an realen Werkstücken resultierende Wert ( $C_{m, \text{gemessen}}$ ) muss wiederum größer oder gleich dem vom Produzenten vorgeschriebene Wert  $C_m$  sein. Wird dies berücksichtigt, so entspricht die Vorgabe eines Fähigkeitsindex der Vorgabe der maximal akzeptierten Standardabweichung seitens des Produzenten für ein toleriertes Maß (Gleichung 3 und Abbildung 7).

Für das in Abbildung 7 dargestellte Beispiel bedeutet dies bei  $C_m = 1,67$ , dass für die ursprüngliche Toleranz von  $\pm 0,1$  mm nun 99,73 % aller an verschiedenen Werkstücken gemessenen Werte eines Toleranzmaßes im Bereich von  $\pm 0,06$  mm liegen müssen. Somit darf die akzeptierte Standardabweichung nur noch einen Wert von maximal  $\pm 10$   $\mu\text{m}$  aufweisen. Diese Werte zu erreichen, stellt eine deutliche Herausforderung für die verketteten Bearbeitungszentren der Großserienfertigung dar, die es zu erfüllen gilt.



# Fehlergrenzen der Bearbeitung

## Fehlergrößen im Prozess und ihre Auswirkungen

Auf den vorangegangenen Seiten wurden die Größenordnungen der Toleranzen an Werkstücken des Pkw-Antriebsstrangs beschrieben. Es stellt sich nun die Frage, wie viel Prozent der verfügbaren Toleranz eines Fertigungsfeatures die im Prozess auftretenden Fehlergrößen aufbrauchen.

Ist die Summe der Fehler größer als die zur Verfügung stehende Toleranz, so ist die Maschine bzw. der Prozess nicht fähig, die gewünschte Bearbeitungsaufgabe zu erfüllen. Im Folgenden werden daher die Fehlergrenzen abgeschätzt, die sich an einer Bearbeitungsmaschine z. B. aufgrund Werkstückspannung oder axialer thermischer Achsdrift einstellen können. Ziel ist es, durch einen Vergleich der verfügbaren Toleranz mit den bestehenden Fehlergrenzen die verbleibende Toleranzreserve abzuschätzen. Diese Reserve dient den Maschinen bzw. dem Prozess dazu, unvorhersehbare oder schwer kontrollierbare Fertigungseinflüsse abzufangen.

### Indextoleranz der Werkstückspannung

Die Beladung der Bearbeitungsmaschinen erfolgt üblicherweise automatisiert durch spezielle Belade-Einheiten wie beispielsweise einen Portallader. Um ein Werkstück bearbeiten zu können, muss es in der Spannvorrichtung der Maschine positioniert und gespannt werden. Da dies alles ohne

manuelle Eingriffe ausgeführt werden muss, erfolgt die Positionierung üblicherweise mittels in die Spannvorrichtungen integrierter Indexstifte. Das bedeutet, dass zwischen den Indexbohrungen jedes Werkstücks und den Indexstiften der einzelnen Spannvorrichtungen der Fertigungslinie eine mechanische Schnittstelle mit Passungstoleranz entsteht.

Laut Zeichnungsangabe steht für jedes auf der Fertigungslinie bearbeitete Werkstück die gleiche Toleranz für die Indexbohrungen zur Verfügung. Das real gefertigte Maß variiert jedoch von Werkstück zu Werkstück. Dies gilt auch für die einzelnen Indexstifte der Spannvorrichtungen. Daher kann nicht von einer stets gleichen Indexierabweichung ausgegangen werden. Die vorgegebenen maximalen Toleranzbereiche für Indexbohrung und Indexstift sollten allerdings jeweils eingehalten werden, da es sonst zu Ausschusswerkstücken kommen würde. Somit lässt sich eine Fehlergrenze abschätzen.

Bei den beschriebenen kubischen Pkw-Antriebsstrangkomponenten (Zylinderkopf, Kurbelgehäuse oder Getriebegehäuse) werden häufig Indexbohrungen von  $\varnothing 12$  mm eingebracht. Ein Klemmen des Werkstücks in der Spannvorrichtung ist unerwünscht, da dies zur Überlast der Bela-

desysteme oder zu Werkstückspannfehlern und damit einem eventuellen Stillstand der Fertigungslinie führen kann. Um dies zu vermeiden, wird im Folgenden eine Übergangspassung  $\varnothing 12$  H7/js6 angenommen. Mit diesen Angaben ergibt sich folgende maximale Fehlergrenze für die Werkstück-indexierung in den Spannvorrichtungen:

$$\text{Indexbohrung} \\ \varnothing 12 \text{ H7} = \varnothing 12 \begin{matrix} +0,018 \\ 0 \end{matrix} \text{ mm} \quad (\text{Gleichung 4})$$

$$\text{Indexstift} \\ \varnothing 12 \text{ js6} = \varnothing 12 \begin{matrix} +0,0055 \\ -0,0055 \end{matrix} \text{ mm} \quad (\text{Gleichung 5})$$

$$\varnothing (12,018 - 11,9945) \text{ mm} \\ \equiv \pm 11,75 \text{ } \mu\text{m} \text{ (radial)} \quad (\text{Gleichung 6})$$

Für die Erzeugung eng tolerierter Features werden die Werkstücke vor dem Spannen zum Teil über entsprechende Schiebezyylinder in der Spannvorrichtung in eine definierte Richtung geschoben. Das bedeutet, das Werkstück wird radial in die Indexstifte gedrückt, sodass ausgehend von der Bohrungsmittelnachse nur noch maximal die halbe Fehlergrenze auftritt ( $\equiv \pm 5,88 \text{ } \mu\text{m}$ ). Da die Verschiebe-Einheiten die Spannvorrichtung jedoch häufig aufwendiger und damit teurer machen, werden diese nicht in allen Bearbeitungsstationen vorgesehen.

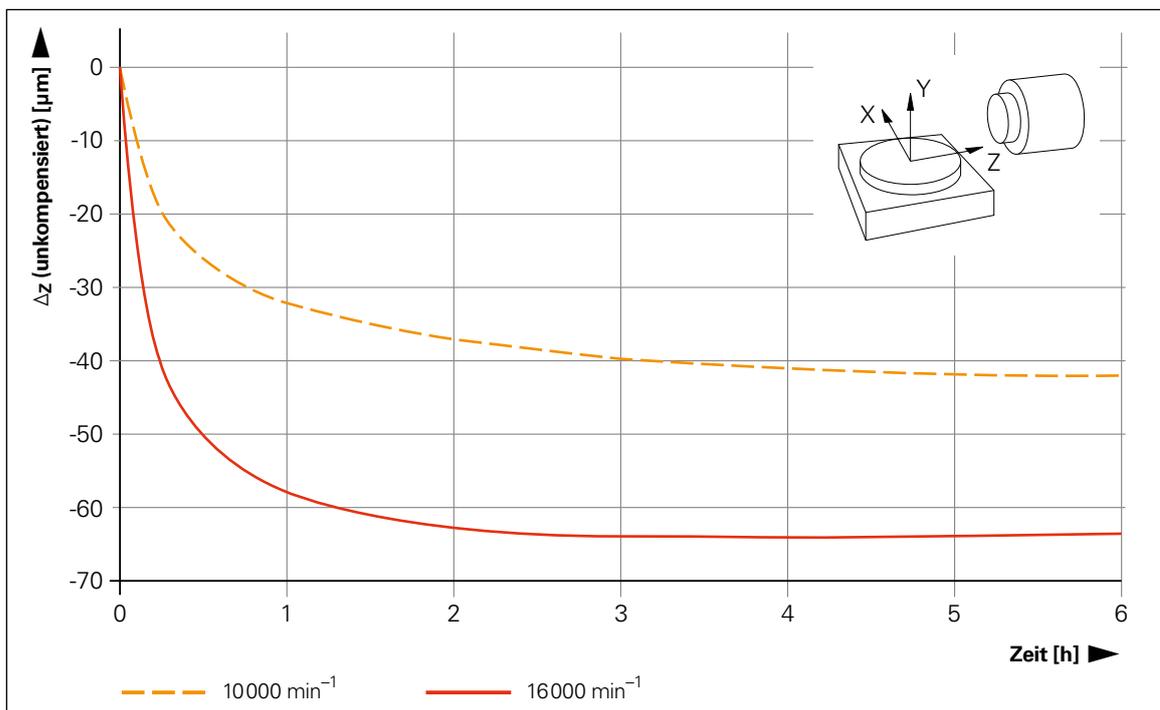


Abbildung 8: Gemessene, unkompensierte Z-Achsdrift aufgrund Arbeitsspindelwärme

### **Toleranzen für den Werkzeugwechsel**

Auf der Seite des Werkzeugs ergeben sich beim Werkzeugwechsel, abhängig von der verwendeten Werkzeugschnittstelle, ebenfalls Ungenauigkeiten. In den aktuellen Bearbeitungszentren der zuvor beschriebenen Fertigungslinien kommen üblicherweise Arbeitsspindeln und Werkzeuge mit Hohlchaftkegel-Schnittstelle (HSK) zum Einsatz. In [8] werden die herrschenden Wiederholgenauigkeiten der HSK-Verbindung mit  $< 1 \mu\text{m}$  (axial) und  $< 3 \mu\text{m}$  (radial) angegeben ( $\cong \pm 0,5 \mu\text{m}$  axial;  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  radial).

### **Thermisch bedingte Drift der Spindel-nase**

Die im Betrieb auftretende axiale Drift an der Spindelnase spielt eine Rolle für Bohrungen mit definierten Tiefenmaßen sowie beim Stirnfräsen, wenn zwei planparallele Flächen mit definiertem Abstand wie z. B. bei der Hauben- und Brennraumfläche am Zylinderkopf erzeugt werden müssen. Im Betrieb hat insbesondere die Wärme-Entwicklung der Arbeitsspindel einen starken Einfluss auf das Wachstum der Spindelwelle sowie der Spindelachsstruktur. Üblicherweise werden in den beschriebenen Produktionsmaschinen Motorspindeln eingesetzt. Die verschiedenen Bearbeitungszustände führen zu wechselnden Leistungsabgaben und damit zu veränderlichen thermischen Lasten, die aus dem integrierten Spindeltrieb sowie den Spindellagern resultieren. Da die Motorspindel hochintegriert in der Achsstruktur der Maschine eingebracht ist, wird die Wärme u. a. über das Gehäuse der Motorspindel sowie über die Montageflächen an die Maschinenachsstruktur weitergeleitet. Die Motorspindel wird daher üblicherweise an ein Kühlaggregat angeschlossen.

Abbildung 8 stellt die Z-Achsdrift in der Aufwärmphase als Ergebnis durchgeführter Driftmessungen an einem Bearbeitungszentrum mit Motorspindel dar. Abgebildet ist die Drift des Tool Center Point relativ zum Maschinentisch, welche sich aufgrund der Leerlauf-Spindeldrehzahl von  $10000 \text{ min}^{-1}$  bzw.  $16000 \text{ min}^{-1}$  ergibt. Zusätzliche thermische Lasten und daraus resultierende Drift aufgrund der im Schnittprozess herrschenden Spindelbelastungen bilden die Messungen nicht ab. Abhängig von der Belastung und Drehzahl der Arbeitsspindel ist jedoch mit deutlich gesteigerten Driftwerten im Vergleich zur Leerlauf-Drehzahl zu rechnen.

Ausgehend von der in Abbildung 8 gezeigten Messkurve bei Belastung mit einer Leerlauf-Drehzahl von  $16000 \text{ min}^{-1}$  ergibt sich eine thermische Drift der Spindelnase relativ zum Maschinentisch in Z-Richtung von ca.  $64 \mu\text{m}$ . Häufig wird die thermische Drift u. a. mittels in der Steuerung hinterlegter Kompensationsmodelle weiter reduziert. Eine Reduktion der dargestellten Drift um ca. 80 % ist dadurch zu erwarten. Auf die abgebildete Messkurve angewendet, bedeutet dies einen Restwert von  $12 \mu\text{m}$  ( $\cong \pm 6 \mu\text{m}$ ).

# Fehlergrenzen der Bearbeitung

## Fehlergrößen durch die Positionsermittlung

Die weiteren Betrachtungen machen eine Unterscheidung bezüglich der Ermittlung des Lage-Ist-Werts an einer Vorschubachse bei Einsatz eines Kugelgewindetriebs notwendig. Der Hauptunterschied kommt hierbei durch den Montage-Ort des Achsmesssystems und dessen Einbindung in den Regelkreis der Vorschubachse zustande. Abbildung 9 stellt den Aufbau einer Vorschubachse mit Semi-Closed Loop im Vergleich zu einer Achse mit Regelung im Closed Loop dar.

### Semi-Closed Loop und Closed Loop

Semi-Closed Loop bedeutet, dass der Lageregelkreis der Vorschubachse über den Drehgeber des Vorschubmotors geschlossen wird. Der Drehgeber erfasst hierbei die Winkellage der Vorschubmotorwelle und nicht die Position des zu positionierenden Achsschlittens. Die Position des Schlittens wird durch die Verrechnung der Winkellage mit der Spindelsteigung des Kugelgewindetriebs ermittelt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Zusammenhang von Winkellage, Spindelsteigung und Schlittenposition während des Betriebs der Vorschubachse bzw. Bearbeitungsmaschine konstant ist. Verändert sich dieser Zusammenhang z. B. aufgrund thermisch bedingter Dehnung oder durch Verschleiß des

Kugelgewindetriebs, so ist der berechnete Positionswert fehlerhaft. Die Regelung und der Drehgeber sind sozusagen blind gegenüber Veränderungen des Antriebsstrangs der Vorschubachse.

Bei Betrieb der Vorschubachse im Closed Loop wird die Position des Schlittens der Vorschubachse mittels Längenmessgerät erfasst und als Lage-Ist-Wert in den Lageregelkreis der Achse zurückgeführt. Auftretende Abweichungen während des Betriebs wie z. B. die thermische Drift des Kugelgewindetriebs werden am Schlitten erfasst und durch die Achsregelung ausgeglichen.

### Systematische und zufällige Positionsabweichungen

Bei der Positionierung von Vorschubachsen kommt es zu Positioniergenauigkeiten ([9], [10]). Es treten systematische Abweichungen auf, welche bei gleichen Randbedingungen reproduzierbar und damit ausgleichbar sind. Ebenso treten zufällige Abweichungen (Arbeitsstreuung) auf, die nicht reproduzierbar sind, jedoch ein weitgehend statistisches Verhalten aufweisen. Die Auswirkung zufälliger Abweichungen auf die Positionierung einer Maschinenachse wird durch die Positionsstreuung beschrieben.

Soll die Maschine beispielsweise eine mit einer Positionstoleranz behaftete Bohrung im Werkstück einbringen, so ist u. a. die Positionsstreuung als nichtreproduzierbarer Fehlereinfluss zu berücksichtigen. Durchgeführte Messungen zeigen, dass typische Größenordnungen für die Positionsstreuung bei Vorschubachslängen von 500 mm bis 800 mm einen Wert von ca. 2  $\mu\text{m}$  ( $\approx \pm 1 \mu\text{m}$ ) aufweisen, wenn die Achsen im Semi-Closed Loop betrieben werden.

Die Anbindung eines Längenmessgeräts am Achsschlitten und die Rückkopplung der Lage-Ist-Werte in den Lageregelkreis vermindern die Auswirkungen der Reibung im Antriebsstrang und in den Linearführungen auf die Positionierung. Messungen zeigen, dass die Positionsstreuung bei Verwendung einer Regelung im Closed Loop typischerweise um 40 % bis 50 % gegenüber dem Semi-Closed Loop reduziert werden kann ( $\approx \pm 0,5 \mu\text{m}$ ).

### Reduktion der thermisch bedingten Drift

In den Technischen Informationen „Genauigkeit von Vorschubachsen“ und „Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen“ beschriebene Messungen zeigen, dass eine im Semi-Closed Loop betriebene

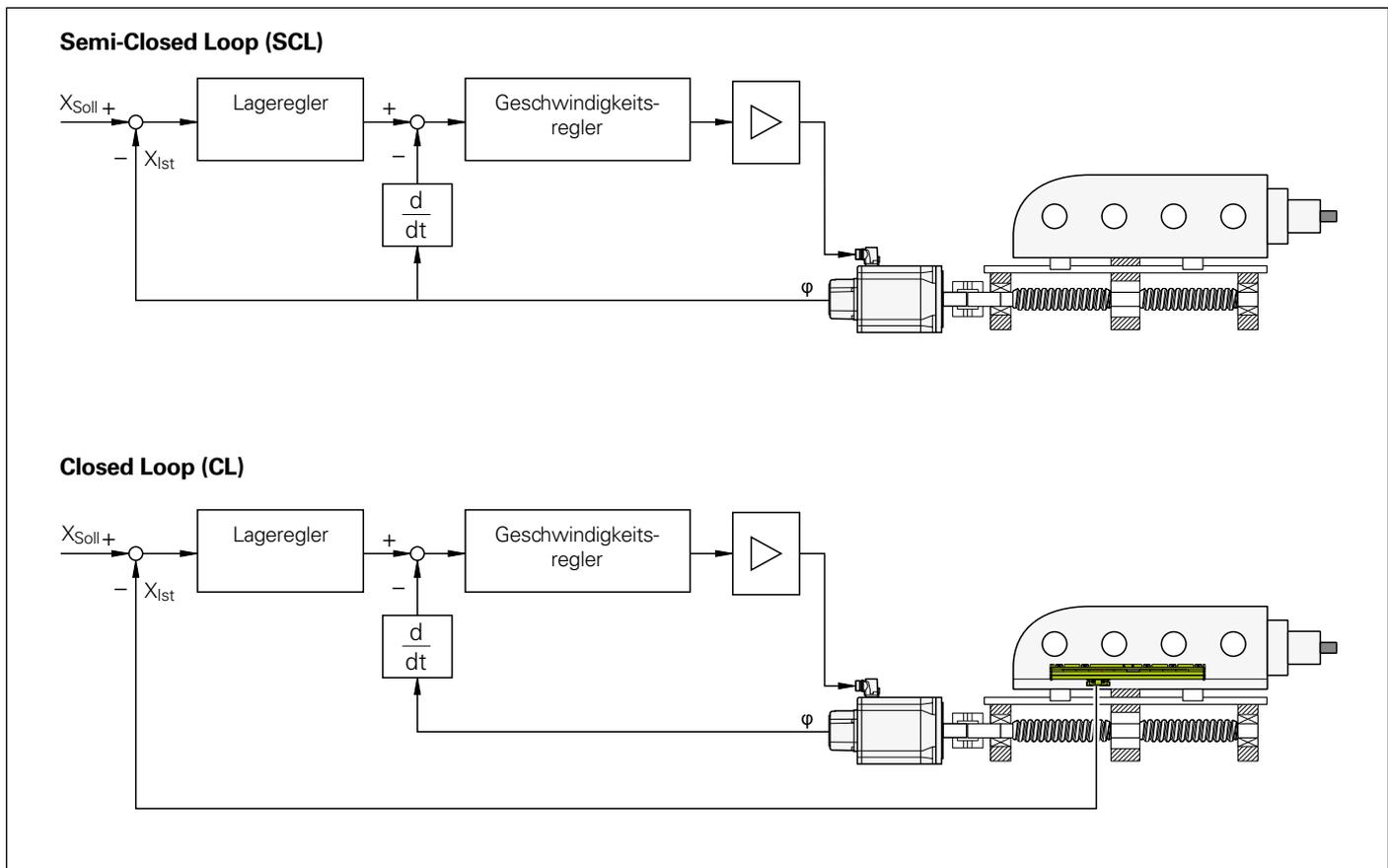


Abbildung 9: Prinzip des Semi-Closed Loop und des Closed Loop

	Abgeschätzte Fehlergrenzen [ $\mu\text{m}$ ]	
	Semi-Closed Loop	Closed Loop
<b>Indexierung Werkstückspannung</b>	$\pm 11,75$ $\pm 5,88$ (mit Verschiebeeinheit)	
<b>Werkzeugwechselgenauigkeit (HSK)</b>	$\pm 0,5$ (axial) $\pm 1,5$ (radial)	
<b>Thermische Arbeitsspindelachsdrift (kompensiert)</b>	$\pm 6$	
<b>Positionsstreuung (500 mm &lt; X <math>\leq</math> 800 mm)</b>	$\pm 1$	$\pm 0,5$
<b>Thermische Drift durch Kugelgewindetrieb-Erwärmung</b>	$\pm 20$ $\pm 10$ (gekühlter Kugelgewindetrieb)	$\pm 1$
<b>Längenmessabweichung Koordinatenmessgerät</b>	$\pm 1,5$	

Tabelle 1: Abgeschätzte Fehlergrenzen für Semi-Closed Loop und Closed Loop

Vorschubachse mit Kugelgewindetrieb und einem Verfahrbereich von 800 mm eine thermisch bedingte Drift von über  $40 \mu\text{m}$  ( $\cong \pm 20 \mu\text{m}$ ) aufweisen kann ([11], [12]). Wird die Lösung dieses Problems in der Kühlung des Kugelgewindetriebes gesucht, so kann unter Verwendung eines hochwertigen Kühlaggregats (Temperaturkonstanz  $\leq 1 \text{ K}$ ) eine Reduktion der Drift um 50 % erzielt werden. Neben der Integration des Kühlaggregats sind dann zusätzliche Leitungen für die Kühlmittelzufuhr und Kühlmittelabfuhr der einzelnen Vorschubachsen sowie Drehdurchführungen für die Übertragung des Kühlmediums auf die rotierenden Kugelgewindetrieb-Spindeln vorzusehen.

Eine deutlich größere Reduktion der thermisch bedingten Drift einer Kugelgewindetrieb-Achse kann durch den Einsatz einer Closed Loop-Regelung erzielt werden. Die Drift der Kugelgewindetrieb-Spindel wird durch das Längenmessgerät erfasst und durch die Achsregelung ausgeregelt. Die verbleibende thermische Drift ist nun  $\leq 2 \mu\text{m}$  ( $\cong \pm 1 \mu\text{m}$ ) [11].

Tabelle 1 fasst die zuvor abgeschätzten Fehlergrenzen zusammen und stellt diese für eine Vorschubachse mit Semi-Closed Loop sowie Closed Loop vergleichend dar.

Um abzuschätzen, welchen Anteil einer zu fertigenden Toleranz die aufgeführten Fehlergrenzen aufbrauchen, ist die Lage des Werkstücks sowie der tolerierten Fertigungsfeatures im Arbeitsraum zu beachten. So benötigen nur die Fehler einen Teil des verfügbaren Toleranzbudgets, die in Richtung des zu fertigenden Toleranzmaßes weisen.

#### Einflüsse der Werkstückprüfung

Die Beurteilung der Maßhaltigkeit der Werkstücke erfolgt üblicherweise in entsprechenden Messräumen mittels Koordinatenmessgeräten. Ein Koordinatenmessgerät ähnelt in seinem geometrischen Aufbau einer Bearbeitungsmaschine und unterliegt ebenfalls Fehlereinflüssen, wodurch sich Messabweichungen bei den zu beurteilenden Werkstückmaßen ergeben. Die Größe der Messabweichungen wird beeinflusst durch:

- Temperaturschwankungen im Messraum
- Geometriefehler des Koordinatenmessgeräts
- Tasterfehler
- die gewählte Messstrategie
- Werkstückaufspannfehler und Bedienerfehler
- ...

Da die verbleibende Messabweichung deutlich geringer sein muss als die zu beurteilende Maßtoleranz, werden Koordinatenmessgeräte üblicherweise in klimatisierten Messräumen betrieben. Weiterhin wird bei der Fertigung und Montage der Koordinatenmessgeräte auf hohe Präzision geachtet und es kommen Längenmessgeräte für die Regelung im Closed Loop zum Einsatz.

Mittels rechnerischer Kompensationen wird eine zusätzliche Reduktion verbleibender Abweichungen (z. B. der Tasterbiegung beim Antasten) erzielt. Zur sicheren Vermessung eines tolerierten Längenmaßes sollte ein Koordinatenmessgerät eine ca. 10fach geringere Längenmessabweichung als die zu beurteilende Toleranz aufweisen. Für eine in der Werkstückzeichnung beschriebene Toleranz von  $\pm 0,1 \text{ mm}$  bedeutet dies  $\pm 10 \mu\text{m}$  oder besser. Um jedoch auch kleinere Toleranzen sicher zu prüfen und universell verwendbare Messmaschinen z. B. in einem Zentralmessraum bereitstellen zu können, werden in der Praxis Koordinatenmessgeräte eingesetzt, die Längenmessabweichungen im Bereich von  $\pm 1,5 \mu\text{m}$  aufweisen.

# Werkstücktoleranz vs. Fehlergrenzen

## Closed Loop steigert Toleranzreserve

Die Gegenüberstellung der auf den Vorseiten geforderten Werkstücktoleranz und der abgeschätzten Fehlergrenzen erfolgt nachstehend anhand einer Beispielgeometrie. Abbildung 10 stellt dazu schematisch die Bohrungen für die Lagerung einer Welle in einem Getriebegehäuse dar.

Um Nebenzeiten und damit die Taktzeit zu reduzieren, können die beiden Bohrungsdurchmesser mittels eines kombinierten Werkzeugs gefertigt werden. Die Schneiden zur Erzeugung der Durchmesser- und Z-Maße werden hierzu auf einem Werkzeug eingebracht. Eine der benötigten Indexbohrungen für die Ausrichtung des Werkstücks ist ebenfalls dargestellt. Die Toleranzrichtung der Indexbohrung weist in die gleiche Richtung wie die tolerierten Fertigungsmaße  $Z_1$  und  $Z_2$ . Für das Maß  $Y$  trifft dies nicht zu.

### Zu berücksichtigende Fehler

Der Fehler, der sich aufgrund der Indexierung des Werkstücks in der Spannvorrichtung ergeben kann, ist somit für die Erzeugung von  $Z_1$  und  $Z_2$  zu berücksichtigen. Da in der Maschine dieser Bearbeitungsoperation weitere Werkzeuge an anderen Bearbeitungsstellen des Werkstücks zum Einsatz kommen, sind die Werkzeugwechsel- Ungenauigkeiten in das Fehlerbudget einzurechnen. Weiterhin sind in Richtung der Maße  $Z_1$  und  $Z_2$  auftretende Fehler aufgrund der thermischen Arbeitsspindel-Achsdrift, der Positionsstreuung bei der Positionierung der Z-Achse in Bearbeitungsrichtung sowie der thermischen Drift in Z-Achse durch die Erwärmung des Kugelgewindetriebs zu beachten. Die Längenmessabweichungen des Koordinatenmessgeräts gehen unabhängig von der Aufspannrichtung des Werkstücks in der Bearbeitungsmaschine in die Fehlerbudgetbetrachtung ein.

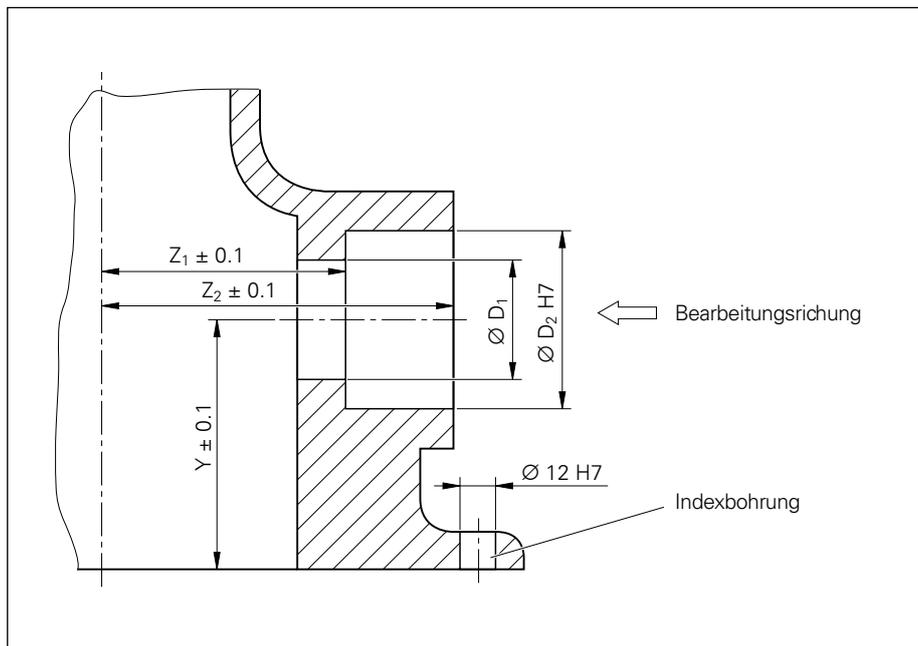


Abbildung 10: Lagerbohrungen im Getriebegehäuse (Beispielgeometrie)

Unter der Annahme, dass die tolerierten Fertigungsmaße mit einem mittleren Maschinenfähigkeitsindex von  $C_m = 1,67$  behaftet sind, lässt sich nun gegenüberstellen, wie groß der Verbrauch der verfügbaren Toleranz durch die abgeschätzten Fehler im ungünstigsten Fall ist. Abbildung 11 zeigt dies für die Toleranzen der Maße  $Z_1$  und  $Z_2$  zunächst am Beispiel der Regelung im Semi-Closed Loop.

Zu erkennen ist, dass der größte Verbraucher der verfügbaren Toleranz die unkontrollierte thermische Drift der Kugelgewindetrieb-Spindel ist. Der am Ende der Aufschlüsselung verbleibende Rest der verfügbaren Toleranz (Toleranzreserve) beträgt lediglich  $\pm 19 \mu\text{m}$ .

### Weniger Fehler, mehr Toleranzreserve

Es wird deutlich, dass die Reduzierung der Fehlergrößen direkt zu einer Steigerung der Toleranzreserve führen. Der Einsatz von Längenmessgeräten an den Linearachsen, d. h. ein Betrieb im Closed Loop, kann insbesondere die thermisch bedingte Kugelgewindetrieb-Drift reduzieren (Abbildung 12). Daraus resultiert eine deutlich gesteigerte Toleranzreserve von  $\pm 39 \mu\text{m}$ .

Wie zuvor beschrieben, ergeben sich in der Großserienfertigung Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fertigungsschritten der Prozesskette. Die in Tabelle 1 aufgeführten Fehlergrenzen entsprechen lediglich einem Teil der potentiellen Fehlergrößen, die sich über die gesamte Fertigungskette eines Bauteils ergeben können. Daher besteht das Ziel darin, innerhalb einer einzelnen Bearbeitungsmaschine minimale Fehlergrößen zu erreichen, um für schwer beeinflussbare Fehler innerhalb des Prozesses eine maximale Toleranzreserve zu schaffen.

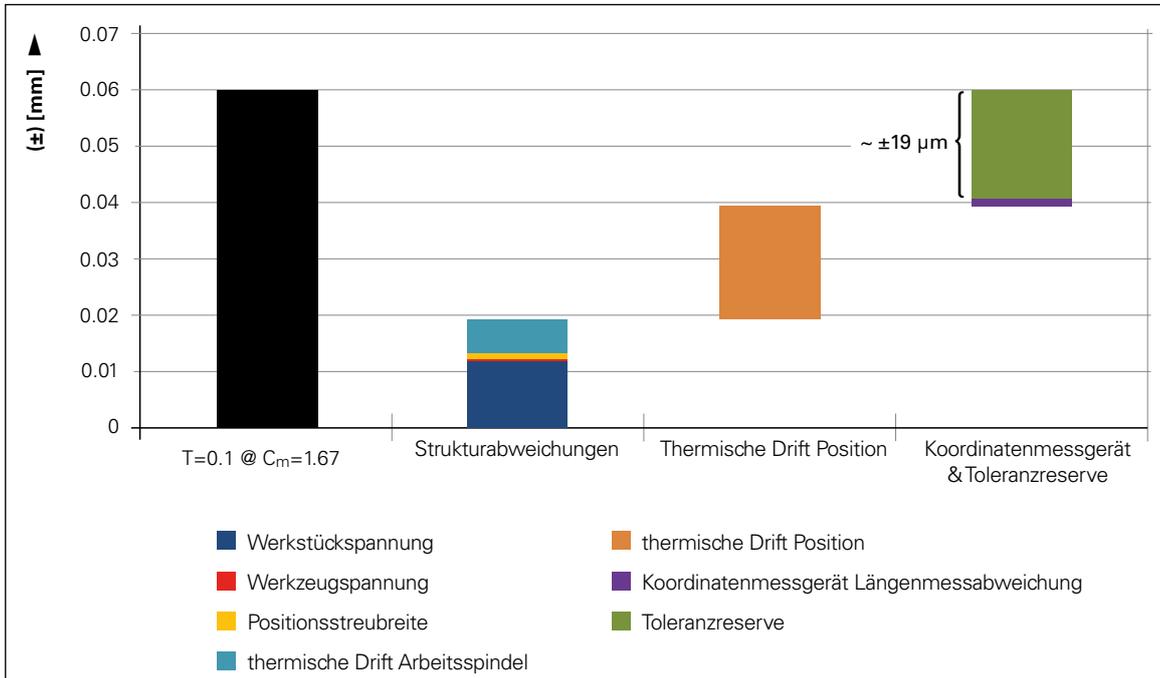


Abbildung 11: Verfügbare Toleranz ( $\pm 0,1$  mm) bei  $C_m = 1,67$  vs. Fehlergrenzen bei Semi-Closed Loop

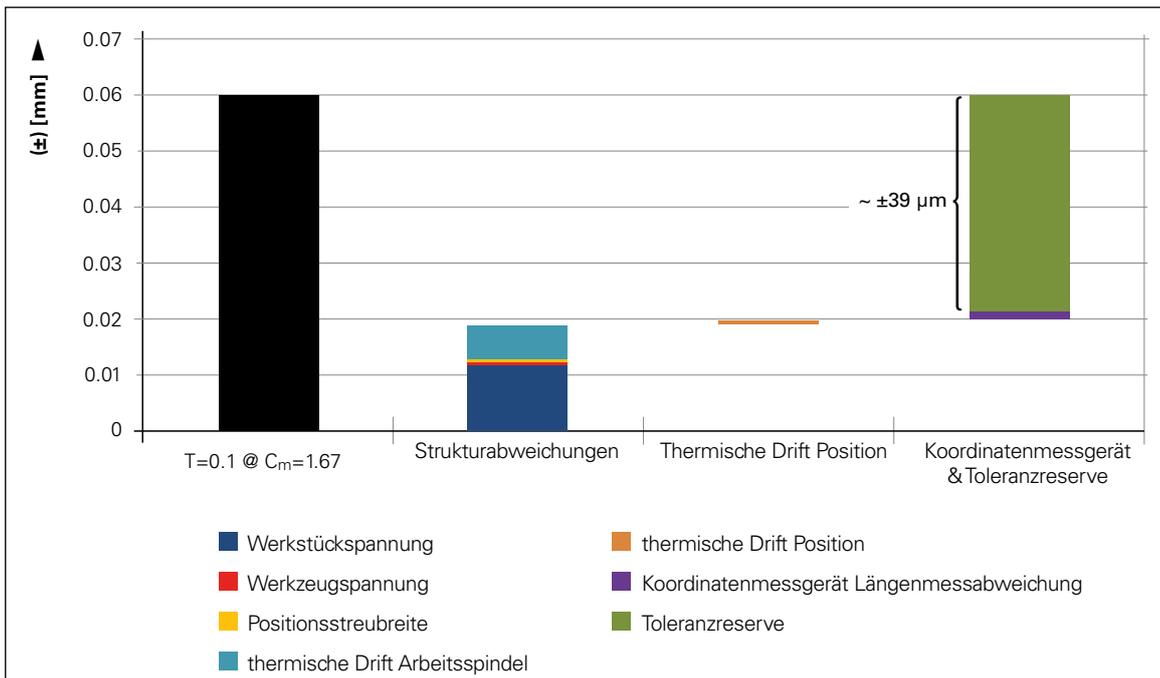


Abbildung 12: Verfügbare Toleranz ( $\pm 0,1$  mm) bei  $C_m = 1,67$  vs. Fehlergrenzen bei Closed Loop

Schwer kontrollierbare Einflüsse innerhalb der Fertigungskette können sein:

- Schwankungen der Halltemperatur
- Schwankungen der Kühlschmierstoff-Temperatur
- Schwankungen der Werkstücktemperatur und damit die thermisch bedingte Ausdehnung des Werkstücks während des Transports zwischen den Maschinen
- statische Verformungen am Werkstück aufgrund variierender Spannkkräfte und Spanntoleranzen der einzelnen Spannvorrichtungen der Fertigungslinie
- thermischer Verzug von Toleranzmaßen aufgrund unterschiedlicher Temperaturen

des Werkstücks in den einzelnen Maschinen (Fertigung der Toleranzmaße) und im Messraum (Beurteilung der Toleranzmaße)

- Werkzeugabdrängung aufgrund ungenauer Vorbearbeitung (z. B. Abdrängung einer Reibahle aufgrund von Toleranzschwankungen der Vorbohrung)
- Späne (z. B. Spannklemmer, Späne in der Vorbohrung etc.)
- Werkzeugverschleiß (z. B. veränderliche Schnittkräfte, Werkzeugabdrängung etc.)
- ...

Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie zeigt jedoch deutlich, dass die Auslegung eines Fertigungsprozesses für die automatisierte mechanische Bearbeitung von Antriebsstrangkomponenten für Fahrzeuge nicht trivial ist. Es bestehen viele mögliche Fehlerquellen, die einen Einfluss auf die Fertigungsqualität, die Fertigungszeit und die Fertigungskosten besitzen.

# Werkstücktoleranz vs. Fehlergrenzen

## Toleranzreserve erhöht Produktivität

Um ein Gefühl dafür zu erhalten, was eine Toleranzreserve von  $\pm 19 \mu\text{m}$  im Semi-Closed Loop bzw.  $\pm 39 \mu\text{m}$  im Closed Loop bedeutet, wird im Folgenden die Größenordnung des Werkzeugverschleißes betrachtet. Während bei Aluminiumwerkstücken trotz schnittscharf erscheinender Schneidkante häufig die Gratbildung am Werkstück zum Werkzeugwechsel führt, tritt insbesondere bei der Bearbeitung von Werkstücken aus Grauguss (z. B. Kurbelgehäuse) oder hochwarmfestem Stahlguss (z. B. Abgasturbolader) erhöhter Werkzeugverschleiß auf. Dieser bildet sich üblicherweise als über der Zeit ansteigende Verschleißmarkenbreite (VB) aus (Abbildung 13).

### Werkzeugverschleiß muss zulässig sein

Aufgrund der Schneidengeometrie (Freiwinkel  $\alpha$  und Spanwinkel  $\gamma$ ) ergibt sich bei Anwachsen der Verschleißmarkenbreite ein entsprechender Schneidkantenversatz (SV), der unmittelbar die Toleranzreserve reduziert. Der Schneidkantenversatz lässt sich nach [13] in Abhängigkeit von der Verschleißmarkenbreite VB sowie von  $\alpha$  und  $\gamma$  wie folgt berechnen:

$$sv = \frac{VB \cdot \tan \alpha}{1 - \tan \alpha \cdot \tan \gamma} \quad (\text{Gleichung 7})$$

Den aktuellen Stand der Linienauslegung mittels verketteter Bearbeitungszentren vorausgesetzt, besitzen die Werkzeugkosten für die mechanische Bearbeitung von Zylinderköpfen, Kurbelgehäusen oder Getriebegehäusen mit 8 % bis 12 % einen erheb-

lichen Anteil am Gesamtanlageninvest. Dies beinhaltet sowohl die nichtverschleißenden Werkzeugkomponenten (Werkzeughalter, Bohrstanzen etc.) sowie die verschleißenden Anteile (Schneidplatten, Bohrer etc.). Der Anteil ist u. a. abhängig von der Anzahl der eingesetzten Ersatzwerkzeuge (z. T. bis zu drei Satz) sowie den verwendeten Schneidstoffen (z. B. PKD-Schneiden für die Aluminiumbearbeitung).

Um laufende Werkzeugkosten zu sparen, sollten die Werkzeuge eine möglichst große Standmenge aufweisen. Ein gewisses Maß an Werkzeugverschleiß muss daher zulässig sein, bevor ein Werkzeugwechsel oder eine Aufbereitung erfolgt.

Für Hartmetallwerkzeuge und die für die Toleranzzeugung relevante Schlichtbearbeitung wird in [14] als Richtgröße für die Verschleißmarkenbreite  $VB = 200 \mu\text{m}$  bis  $400 \mu\text{m}$  angegeben. Um eine Größenordnung für den Schneidkantenversatz zu erhalten, werden folgende typische Schneidwinkel angesetzt:  $\alpha = 5^\circ$  und  $\gamma = 4^\circ$ . Unter Verwendung von Gleichung 7 ergibt sich ein Bereich für den Schneidkantenversatz von  $18 \mu\text{m}$  bis  $35 \mu\text{m}$ .

Ausgehend von einer schnittscharfen Kante in der Mitte der Toleranzzone benötigen im Semi-Closed Loop bereits die anzustrebenden minimalen Werkzeugverschleißwerte den größten Teil der verbleibenden Toleranzreserve. Mit Blick auf die größeren Toleranzreserven bei Verwendung von Län-

genmessgeräten können mehr Werkstücke bearbeitet werden, bevor eine Korrektur des Werkzeugverschleißes erfolgen muss. Dies wiederum bedeutet weniger Prüfaufwände an den Werkstücken, um den richtigen Zeitpunkt der Korrektur oder des Werkzeugwechsels zu erfassen.

### Werkzeugwechsel unterbrechen Produktion

Der Wechsel eines Werkzeugs, durch das ein kritisches Toleranzmaß zu fertigen ist, erfordert häufig ein direkt zu prüfendes und für in Ordnung befundenes Werkstück (i. O.-Teil). Um Ausschussteile zu verhindern, steht die Bearbeitungsmaschine während der Vermessung dieses ersten, mit dem neuen Werkzeug gefertigten Werkstücks. Die Freigabe der Maschine erfolgt erst dann, wenn das gefertigte und vermessene Werkstück einem i. O.-Teil entspricht. Die Wartezeit bis zur Freigabe ist gleichzusetzen mit Teilverlust, da Fertigungszeit auf der Maschine verloren geht.

Da die Prüf- und Korrekturaufwände reduziert und die Maschinenlaufzeiten gesteigert werden können, trägt eine große Toleranzreserve in der Großserienfertigung zur Erhöhung der Produktivität bei. In Analogie zum Autofahren würde dies einer Fahrt innerhalb einer breiten Fahrspur entsprechen, bei der wenig Korrekturaufwand seitens des Fahrzeugführers notwendig ist, um die Spur zu halten. In verengten Fahrspuren ist ein weit größerer Korrekturaufwand erforderlich.

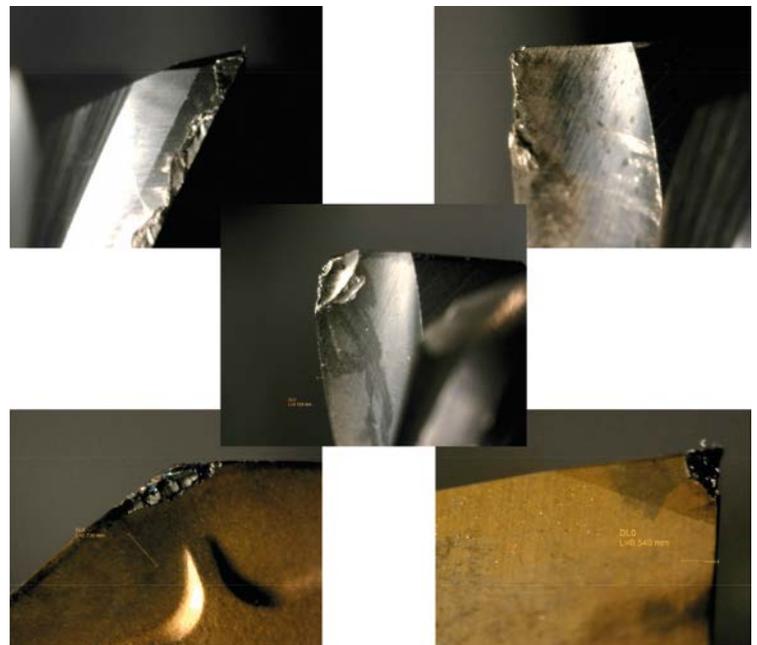
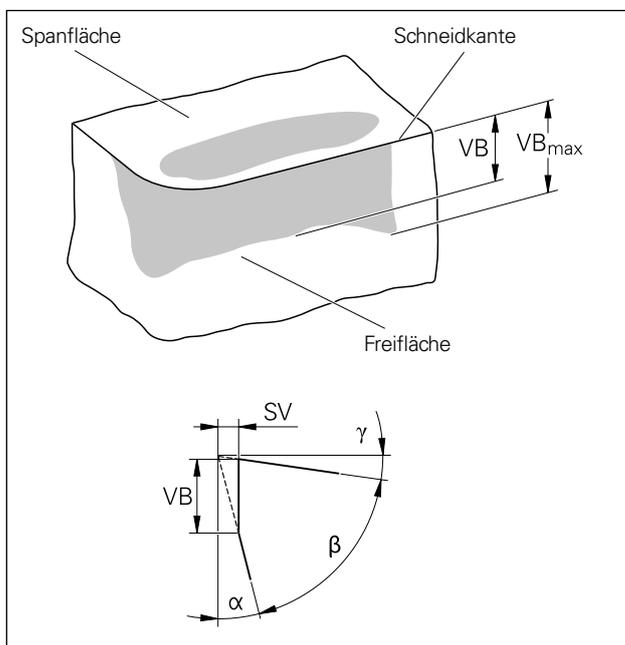


Abbildung 13: Verschleißmarkenbreite (VB) und Schneidkantenversatz (SV) – Zeichnungen nach [13] und [14]

# Zusammenfassung

Neben der Herausforderung flexibel auf Nachfrageschwankungen der Absatzmärkte für Fahrzeuge reagieren zu können, wird es zukünftig weiter steigende Anforderungen bezüglich des Schadstoffausstoßes sowie des Kraftstoffverbrauchs von Fahrzeugen seitens der Gesetzgeber und Endkunden geben. Ein Ansatz dem zu begegnen, besteht darin, die Reibung im Antriebsstrang zu reduzieren. Dies wiederum macht Werkstücktoleranzen sowie Oberflächen-Kennwerte höherer Qualität notwendig.

Durch die in der automatisierten Großserienfertigung vorliegende sequentielle Werkstückbearbeitung bestehen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Fertigungsschritten der Prozesskette. Für die sichere Einhaltung der Werkstücktoleranzen im Gesamtprozess besteht das Ziel darin, einen möglichst geringen Anteil der verfügbaren Toleranzen durch die einzelnen Bearbeitungsmaschinen zu verbrauchen. Die verbleibende Toleranzreserve steht für schwer kontrollierbare Prozesseinflüsse zur Verfügung und sollte demnach möglichst groß sein.

Der Einsatz von Längenmessgeräten in den Vorschubachsen der Bearbeitungszentren trägt zur Steigerung der Maschinengenauigkeit und daraus resultierend der Toleranzreserve bei. Prüfaufwände sowie Teileverluste können reduziert werden, wodurch die Produktivität steigt.

## Literatur

- [1] Kasper, G.: *Challenges for Future Powertrain Production – Insights to Global Manufacturing*. 12th Powertrain Manufacturing Conference, Darmstadt, September 26th – 27th, 2013.
- [2] Abele, E.; Hueske, B. und Kuhn, S.: *Overall Equipment Flexibility – Entwicklung einer Methodik zur Messung der Gesamtanlagenflexibilität für die spanende Fertigung*. ZWF 103 Nr. 5, 2008.
- [3] Dörr, J.: *Powertrain Machine Tool Concepts: Comparison from an Economic Point of View*. 10th Powertrain Machining Conference, Fellbach, November 11th – 12th, 2009.
- [4] Abele, E.; Wiegel, F.; Kuske, P. und Hueske, B.: *Kleine Schritte für große Flexibilität – Eine Methodik zur monetären Beurteilung der Expansionsflexibilität von Fertigungssystemen*. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 100, 2010.
- [5] Stürenburg, B.: *Optimierung der Spanbildung und Minimierung des Späneintrages in das Werkstück für das Bohren von Al-Legierungen*. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK, Band 02/2009.
- [6] Abele, E.; Ellermeier, A.; Hohenstein, J. und Tschannerl, M.: *Untersuchungen an langen VHM-Spiralbohrern – Einfluss der Werkzeuglänge auf das dynamische Verhalten von Vollhartmetallschneidbohrern*. wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97, 2007.
- [7] VDMA 8669 : 1999-01: *Fähigkeitsuntersuchungen zur Abnahme spanender Werkzeugmaschinen*. Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), 1999.
- [8] MAPAL: *MAPAL Kompetenz – Spanntechnik*. Firmenschrift MAPAL Präzisionswerkzeuge Dr. Kress KG, Bestell-Nr. 10138532 | V2.1.0, 2015.
- [9] DIN ISO 230-2 : 2000-05: *Prüfregeln für Werkzeugmaschinen – Teil 2: Bestimmung der Positionierunsicherheit und der Wiederholpräzision der Positionierung von numerisch gesteuerten Achsen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2000.
- [10] VDI/DGQ 3441: *Statistische Prüfung der Arbeits- und Positionsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen - Grundlagen*. Verein Deutscher Ingenieure / Deutsche Gesellschaft für Qualität, März 1977.
- [11] HEIDENHAIN: *Technische Information – Genauigkeit von Vorschubachsen*. März 2006.
- [12] HEIDENHAIN: *Technische Information – Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen*. September 2011.
- [13] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M. und Tikal, F.: *Zerspantechnik – Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Vieweg + Teubner Verlag, 12. Auflage, 2008.
- [14] GARANT: *GARANT ToolScout – Zerspantungshandbuch*. ISBN 3-00-016882-6, veränderter ND 04/2013.

# Längenmessgeräte für Werkzeugmaschinen

Für eine hohe Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen sind Längenmessgeräte zur Lage-Rückmeldung unerlässlich. Sie erfassen den Verfahrweg der Vorschubachse direkt und unmittelbar. Mechanische Übertragungselemente haben somit keinen Einfluss auf die Positionserfassung – sowohl kinematische als auch thermische Fehler oder Kräfteinflüsse werden vom Längenmessgerät erfasst und im Lageregelkreis berücksichtigt. Dadurch lässt sich eine Reihe von möglichen Fehlerquellen ausschließen:

- Positionierfehler aufgrund der Erwärmung der Kugelumlaufspindel
- Umkehrfehler
- Fehler infolge Verformung der Antriebsmechanik durch Bearbeitungskräfte
- kinematische Fehler durch Steigungsfehler der Kugelumlaufspindel

Für Maschinen mit hohen Anforderungen an die **Positioniergenauigkeit** und an die **Bearbeitungsgeschwindigkeit** sind deshalb Längenmessgeräte unerlässlich.

Die HEIDENHAIN-Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen sind universell einsetzbar. Sie eignen sich für Maschinen und Anlagen, an denen Vorschubachsen geregelt verfahren werden – wie z. B. für Fräsmaschinen, Bearbeitungszentren, Bohrwerke, Dreh- und Schleifmaschinen. Das günstige dynamische Verhalten der Längenmessgeräte, ihre hohe zulässige Verfahrgeschwindigkeit und Beschleunigung in Messrichtung prädestinieren sie sowohl für den Einsatz an hochdynamischen konventionellen Achsen als auch für Direktantriebe.



LC 485 bis 2040 mm



LC 185 bis 4240 mm



LB 201 bis 28040 mm

## HEIDENHAIN

**DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH**

Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5

**83301 Traunreut, Germany**

☎ +49 8669 31-0

FAX +49 8669 32-5061

E-mail: [info@heidenhain.de](mailto:info@heidenhain.de)

[www.heidenhain.de](http://www.heidenhain.de)

### Weitere Informationen:

- Katalog *Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen*
- Technische Information *Genauigkeit von Vorschubachsen*
- Katalog *Messgeräte zur Abnahme und Kontrolle von Werkzeugmaschinen*

