

Kompensation der Restunwucht einer magnetisch gelagerten Spindel¹

Dipl.-Ing. Christiane Rehm, Dr.-Ing. Jürgen Thiele²

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes „Bereitstellung von Parametern für digital geregelte Magnetspindeln und Entwicklung der Benutzungsoberfläche“ werden die Vorteile, welche magnetisch gelagerte Spindeln gegenüber Spindeln mit Wälzlagern haben, im Bereich der HSC-Bearbeitung ausgenutzt. Die Anforderungen an die Oberflächenqualität der Werkstücke ist sehr hoch, deshalb müssen möglichst alle Störquellen ausgeschlossen werden. Eine Störquelle sind Schwingungen, die durch unwuchtbedingte Kräfte hervorgerufen werden. Ein ruhiger, geräuscharmer Lauf wird immer auch zur Beurteilung der Qualität herangezogen und so können Schwingungen die Wettbewerbsfähigkeit eines Erzeugnisses erheblich beeinträchtigen /SCH/.

2 Problemstellung

Die steigenden Spindeldrehzahlen an Werkzeugmaschinen erfordern, dass die Werkzeugaufnahmen mit montierten Werkzeugen immer besser ausgewuchtet werden. Die vorhandenen Unwuchten erzeugen Schwingungen, die sich insbesondere bei hochdynamischen Spindeltrieben, wie sie in Werkzeugmaschinen für die HSC-Bearbeitung zu finden sind, sehr schnell zu einer den Prozess wesentlich verschlechternde Größe aufschwingen können.

Die Folgen durch diese unerwünschten Schwingungen sind bekannt:

- kurze Standzeiten der Schneiden am Werkzeug
- stark eingeschränkte Lebensdauer der Spindellagerungen
- kostenintensiver Ausfall von Spindeltrieben
- schlechte Oberflächen auf den Werkstücken
- technologisch mögliche Schnittgeschwindigkeiten können nicht realisiert werden
- enge Bearbeitungstoleranzen können nicht mehr eingehalten werden

Deshalb ist es erforderlich, schon bei mittleren Betriebsdrehzahlen die verwendeten Werkzeuge auszuwuchten /HOF/.

Neben den ausgewuchteten Werkzeugen ist es für die Vermeidung von Schwingungen notwendig, dass die Massenverteilung eines Rotors so verbessert wird, dass in seinen Lagern möglichst geringe Fliehkräfte wirken.

Beim Auswuchten muss darüber hinaus die Unwuchtart berücksichtigt werden.

3 Was ist beim Auswuchten zu beachten?³

¹ Teilergebnis aus dem Projekt KF 0008802KBVO, Projektform Kooperationsprojekt des BMWi-Förderprogramms ProInno

² Geschäftsführer der AXOMAT GmbH Berggießhübel, Partner im Kooperationsprojekt

Aufgrund ihrer Wirkung lassen sich Unwuchten in unterschiedliche Arten einteilen. Neben der Gestalt und Aufgabe eines Rotors, beeinflusst die Unwuchtart die Lage der Ausgleichsebenen und die Wahl der Auswuchttoleranz. Die wichtigsten Unwuchtarten sind:

- Statische Unwucht
- Momentenunwucht
- Dynamische Unwucht.

3.1 Statische Unwucht

Eine statische Unwucht kann man bestimmen, indem man den Rotor auf zwei „Böcken“ lagert. Der Rotor beginnt zu pendeln. Wenn er seine Ruhelage findet, zeigt die „schwere Stelle“ nach unten. Diese Unwucht wirkt ohne Rotation und wird deshalb als „statische Unwucht“ bezeichnet“.

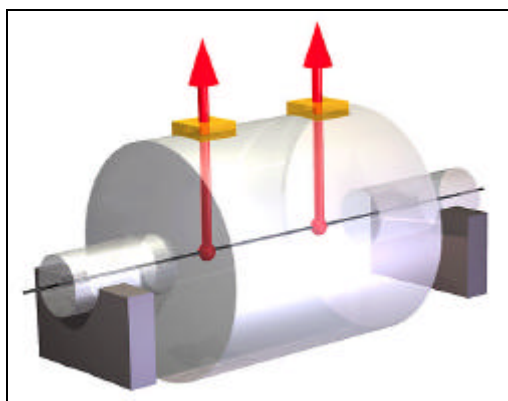


Bild 1: Statische Unwucht

Im Bild 1 sind durch die beiden Pfeile zwei Unwuchten dargestellt, die die gleiche Größe und Winkellage und gleich weit vom Schwerpunkt entfernt sind. Ersetzt man diese beiden Unwuchten durch eine doppelt so große, die im Schwerpunkt angreift, erhält man denselben Zustand.

Diese Unwucht bewirkt, dass der Rotor während des Betriebes parallel zu seiner Rotationsachse schwingt, weil sein Massenmittelpunkt aus der geometrischen Mitte verschoben wurde.

Eine statische Unwucht wird im Allgemeinen in der Schwerpunktebene ausgeglichen. Dies geschieht durch Massenausgleich, entweder es wird an der „schweren Stelle“ Masse entfernt oder es wird an der gegenüberliegenden Seite Masse hinzugefügt.

³ Die im Abschnitt 3 enthaltenen Bilder und Inhalte gehen auf /SCH/ zurück.

3.2 Momentenunwucht

Wird ein Rotor wieder auf zwei „Böcken“ gelagert und er nimmt nach dem Auspendeln keine eindeutige Lage ein, kann er mit einer Momentenunwucht belastet sein.

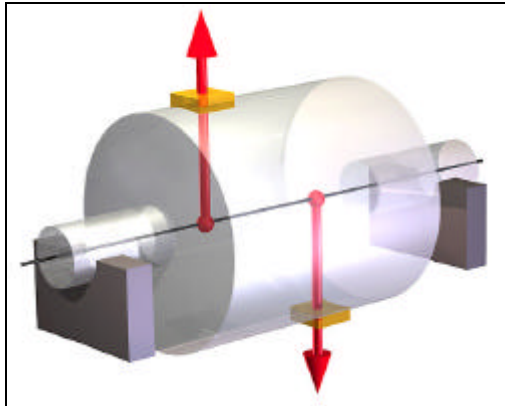


Bild 2: Momentenunwucht

Wenn zwei gleichgroße Unwuchten in ihrer Winkellage um 180° versetzt sind (Bild 2) können diese nicht mehr durch Auspendeln bestimmt werden.

Der drehende Rotor führt eine Taumelbewegung aus. Diese Bewegung wird um eine Achse senkrecht zur Drehachse ausgeführt, weil die beiden Unwuchten ein Moment ausüben. Daraus leitet sich die Bezeichnung „Momentenunwucht“ für diesen Unwuchtzustand ab.

Zur Korrektur der Momentenunwucht ist ein Gegenmoment erforderlich. Es müssen zwei gleich große Korrekturunwuchten entsprechend der ursprünglichen Unwucht in beiden Ausgleichsebenen um 180° versetzt angeordnet werden.

3.3 Dynamische Unwucht

Betrachtet man einen realen Rotor, so erkennt man, dass sich theoretisch sehr viele (unendlich viele) Unwuchten im Rotor befinden.

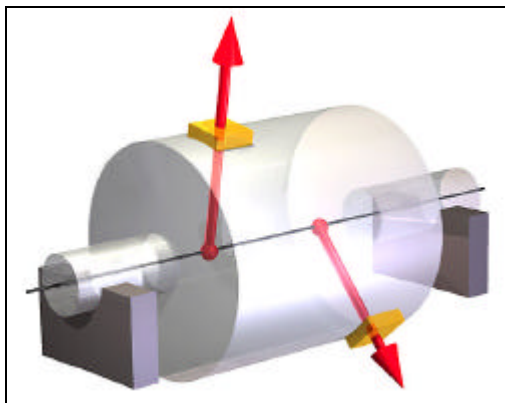


Bild 3: Dynamische Unwucht

Im Bild 3 sind die unendlich vielen Unwuchten durch zwei Unwuchten zusammengefasst. Diese liegen in unterschiedlichen Ebenen und haben im Allgemeinen unterschiedliche Beträge und Winkellagen.

Dieser Unwuchtzustand lässt sich nur unter Rotation vollständig feststellen und wird deshalb als „dynamische Unwucht“ bezeichnet.

Die dynamische Unwucht lässt sich in eine statische Unwucht und eine Momentenunwucht zerlegen. Welcher der beiden Anteile überwiegt, ist von Fall zu Fall unterschiedlich.

Will man die dynamische Unwucht vollständig ausgleichen, so muss man in zwei Ausgleichsebenen auswuchten.

3.4 Gegenüberstellung

Statische Unwuchten lassen sich durch Abtragen oder Hinzufügen von Masse in einer Ebene, meist der Schwerpunktebene, beseitigen. Diese Vorgehensweise findet man häufig beim Auswuchten von Werkzeugaufnahmen, die für eine Betriebsdrehzahl bis zu 20000 U/min vorgesehen sind.

Bei dynamischer Unwucht muss in zwei Ebenen kompensiert werden. Dies ist notwendig, wenn lange Werkzeuge bzw. Werkzeugaufnahmen für Betriebsdrehzahlen über 20000 U/min ausgewuchtet werden /Hof/.

4 Kompensation der Restunwucht einer magnetisch gelagerten Spindel

Die Welle wird bereits ausgewuchtet eingebaut. Die Position des Werkzeuges verursacht eine Unwucht bzw. es ist auch nach dem Auswuchten noch eine Restunwucht vorhanden.

Die Restunwucht der Spindel wird im Gesamtsystem bestimmt und anschließend mechanisch oder unter Ausnutzung der Möglichkeiten der Magnetlager-Regelung kompensiert.

4.1 Bestimmung der Restunwucht

Bestandteil der Regelung ist ein Beobachter, der nicht gemessene Größen schätzt und aufbereitet. Verschiedene Beobachter übernehmen unterschiedliche Funktionen. So kann mit einem speziellen Beobachter gewährleistet werden, dass sich der Rotor ohne zusätzliche Kräfteinflüsse um seine Hauptträgheitsachse (Bild 4) dreht.

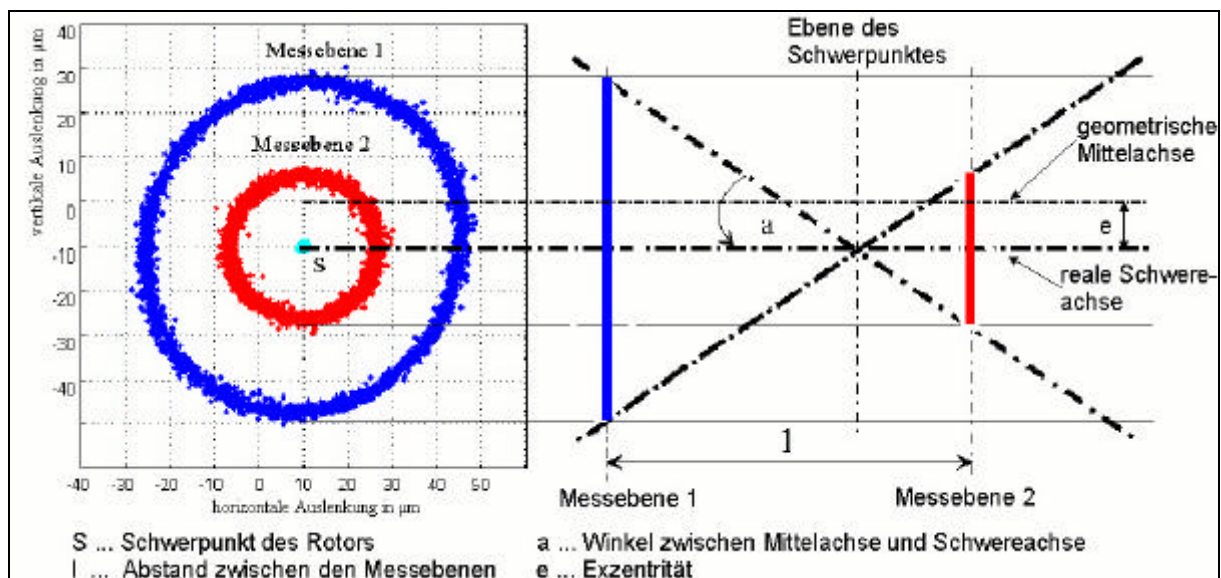


Bild 4: Rotor dreht um seine Hauptträgheitsachse

Die Ebene des Schwerpunktes (Bild 4) wird vor dem Zusammenbau der Spindeleinheit bestimmt. So kann davon ausgegangen werden, dass die Schwerpunktebene bekannt ist. Die Darstellung der Lage der realen Schwereachse erfolgt im Bild 4 in

der Ebene, dies dient der Vereinfachung. Die Schwereachse kann jede beliebige Lage im Raum einnehmen.

Die Auslenkung der Welle wird je Umdrehung in 360 Punkten bestimmt. Diese Werte werden gemittelt. Die Abstände zwischen den Mess-Ebenen und der Ebene des Schwerpunktes sind bekannt, über den Strahlensatz wird die Exzentrizität e berechnet. Obwohl diese bei einer gut ausgewuchteten Welle sehr gering ist und damit auch die auftretende Fliehkraft klein ist, haben praktische Tests bewiesen, dass diese Kräfte in der Präzisionsbearbeitung nicht vernachlässigt werden dürfen. Insbesondere wirken diese sich bei der HSC-Bearbeitung aus, da die Drehzahl quadratisch in die Fliehkraft eingeht.

Für eine 10 kg schwere Welle mit 10 gmm Unwucht beträgt bei 10000 U/min die Fliehkraft rund 1 N, bei 30000 U/min sind es bereits rund 10 N. Bei hochdrehenden Wellen erreicht die Fliehkraft schnell Werte im Bereich der Bearbeitungskraft.

Diese „Kraftfreistellung“ erfolgt nur zur Bestimmung der Unwucht, es können keine Bearbeitungskräfte aufgebracht werden.

4.2 Varianten der Unwuchtkompensation

Mechanische Kompensation

Die Unwucht kann durch Hinzufügen oder Entfernen von Masse beseitigt werden. Durch Auswertung der Auslenkung des Rotors kann der Ort bestimmt werden, an dem diese Massen verändert werden müssen.

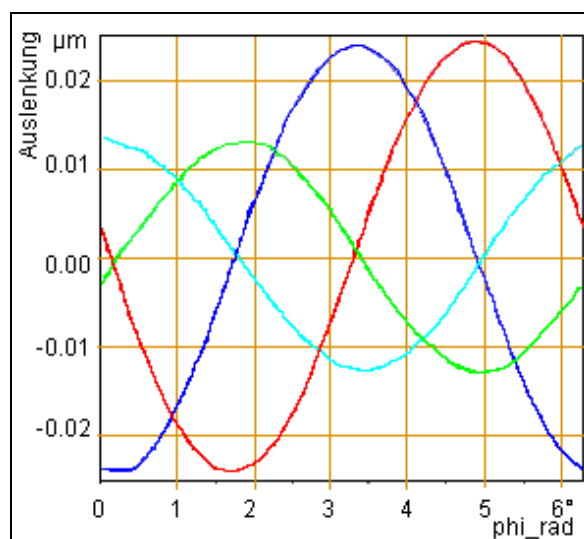


Bild 5: Auslenkung des Rotors

Dazu wird entsprechend Bild 5 die Auslenkung des Rotors in der vorderen und hinteren Mess-Ebene jeweils in der horizontalen und vertikalen Richtung dargestellt. Die Auslenkung wird in Abhängigkeit des Drehwinkels des Rotors abgebildet. Damit ist es möglich, den Ort der Unwucht festzustellen.

Um die Unwucht zu kompensieren, werden in der Nähe der beiden Mess-Ebenen Schrauben in den Rotor gedreht.

Elektromagnetische Kompensation

Neben dieser mechanischen Kompensation besteht die Möglichkeit, den Rotor durch Vorgabe einer sinusförmigen Sollposition auf einer Bahn so zu bewegen, dass er sich um seine Hauptträgheitsachse dreht. Diese erzwungene Bewegung erfolgt mit Arbeitsdrehzahl.

Durch die sinusförmige Bahnvorgabe wird das Werkzeug von seiner eigentlichen Sollposition abgelenkt. Die Abweichung ist so gering, dass beim Vorbohren runder Löcher diese Ablenkung unbeachtet gelassen werden kann.

Bei der Feinbearbeitung muss die Auslenkung für die Unwuchtfreistellung in der Regelung bei der Berechnung der Sollkurve des Werkzeuges mit verrechnet werden. Es ist immer abzuwägen, ob die absolut wuchtfreie Bewegung der Spindel oder die mögliche Kraftübertragung das entscheidende Kriterium für die Vorgabe der Regelparameter an die Regelung ist.

5 Ergebnisse

Die Regelung der magnetisch gelagerten Spindel ist ein sehr komplexer Algorithmus. Zahlreiche Einflussfaktoren bestimmen das Endergebnis – das fertige Werkstück.

Im Bereich der Präzisionsbearbeitung, bei der Genauigkeiten von einem Mikrometer gefordert werden, spielt der schwingungsfreie Lauf der Spindeln eine wichtige Rolle. Dazu ist es notwendig, dass die Spindeln möglichst unwuchtfrei sei.

Ohne die Unwuchtkompensation über die Magnetlager-Regelung, konnten Bohrungen mit einer Rundlaufabweichung von $\pm 1.5 \mu\text{m}$ hergestellt werden.

Weitere Verbesserungen der Regelparameter und das Unwuchtfreistellen der Welle ermöglicht es, Bohrungen mit einer Genauigkeit von $\pm 0.8 \mu\text{m}$ herzustellen.

Für spezielle Anwendungen, z. B. Kolben in Verbrennungsmotoren, müssen Bohrungen mit einer vorgegebenen Ovalität hergestellt werden. Außerdem öffnet sich der Bohrungsquerschnitt entlang der Bohrungslängsachse trompetenförmig (siehe Bild 6).

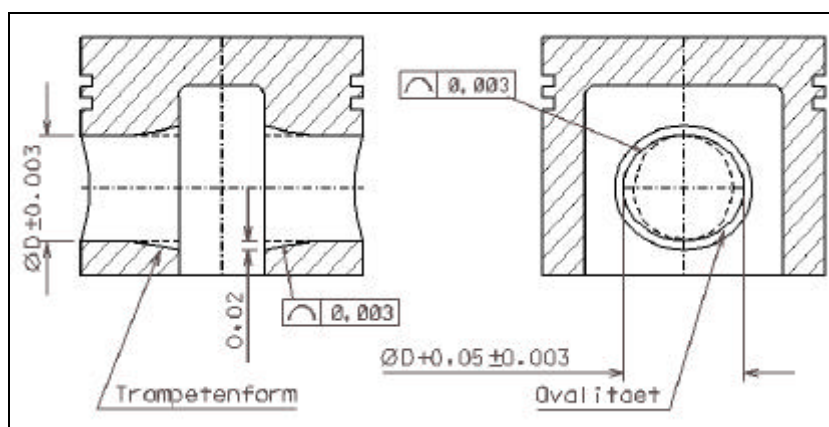


Bild 6: Zeichnung für einen Kolben

Dazu wird in einem ersten Bearbeitungsschritt ein rundes Loch vorgebohrt. Dabei wurden o.g. Genauigkeiten erreicht.

Im nächsten Bearbeitungsschritt wird der Querschnitt der Bohrung verändert. Die Magnetlager-Regelung verändert die Position des Rotors in den Lagern so, dass eine ellipsenförmige Bohrung (**Bild 7**) entsteht.

Die Bewegung des Maschinenschlittens in Längsrichtung der Bohrung wird von der CNC der Maschine gesteuert.

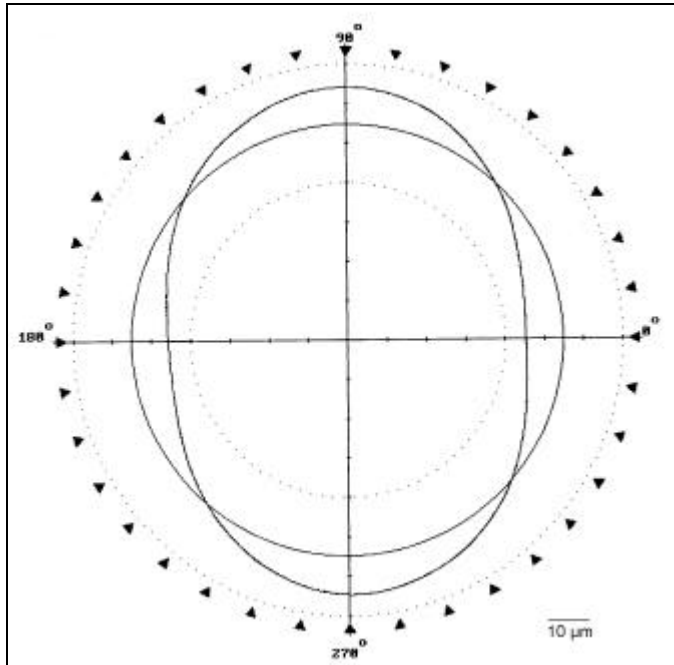


Bild 7: Ellipsenförmige Bohrung

Bisher werden solche Bohrungen mit speziellen Schiebewerkzeugen hergestellt.

Die Ausnutzung der Möglichkeiten der Regelung der Magnetlagerung ermöglicht es, die Auswuchtung der Welle noch weiter zu verbessern. Damit sind sehr genaue Werkstücke herstellbar.

Literatur

- /HOF/ HOFMANN Mess- und Auswuchttechnik GmbH & Co.KG
http://www.auswuchttechnik.de/standard/allgemein/allg_a.htm
- /SCH/ Schenck RoTec GmbH, Darmstadt
http://www.auswuchten.com/warum_auswuchten/stat_unwucht.html