

1 Einleitung

Fünfachsiges Werkzeugmaschinen zur Fräsbearbeitung stellen einen wettbewerbsentscheidenden Produktionsfaktor in der Luftfahrttechnik, der Medizintechnik, der Energietechnik, dem Werkzeug- und Formenbau sowie der Verfahrenstechnik dar [HEID11] (vgl. Bild 1.1). Die kinematischen Freiheitsgrade dieser Maschinen ermöglichen eine nahezu beliebige Orientierung von Werkzeug zu Werkstück. Diese Eigenschaft führt zu zahlreichen prozesstechnischen und wirtschaftlichen Vorteilen in Bezug auf die Fertigung geometrisch anspruchsvoller Werkstücke. Zudem werden Möglichkeiten zur Realisierung völlig neuartiger Werkstücke eröffnet. Darüber hinaus können durch die kinematischen Eigenschaften Umspannvorgänge, welche zur Änderung der Werkstückorientierung notwendig sind, entfallen. Als Konsequenz sind eine zunehmende Automatisierbarkeit der Fertigung und eine bessere Auslastung der Maschinen durch reduzierte Nebenzeiten realisierbar. Durch den Wegfall von Umspannvorgängen kann zudem eine prinzipiell höhere Fertigungsgenauigkeit gegenüber Dreiachsmaschinen erreicht werden [HEID11, BUCH07]. Um die höhere Fertigungsgenauigkeit in der Praxis sicherzustellen und damit die prozesstechnologischen Vorteile ausschöpfen zu können, sind aber hohe zeitliche und instrumentelle Aufwände erforderlich, die einen konkreten Forschungsbedarf darstellen.



Bild 1.1: Anwendungsbeispiele der fünfachsiges Fräsbearbeitung

Application Examples of five-axis Milling

Neben prozesstechnischen Einflüssen resultiert die Fertigungsgenauigkeit aus der Maschinengenauigkeit. Diese basiert wesentlich auf der geometrischen Präzision der Maschinenachsen. Die Achsen weisen verschiedenartige, ungewollte geometrische Abweichungen von der Soll-Bewegung auf. Diese als geometrische Achsfehler bezeichneten Abweichungen führen zu einer fehlerhaften Positionierung von Werkzeug zu Werkstück und somit zu Form- und Lagefehlern am Werkstück. Die Ausprägung der fehlerhaften Positionierung resultiert dabei aus der Summation aller Achsfehler. Dies führt dazu, dass die Fertigungsgenauigkeit fünfachsiges Fräsmaschinen in der Regel deutlich geringer als die der dreiachsigen Maschinen ist [HEID11]. Die größere Anzahl an Achsfehlern ist aber nur ein Beitrag in Bezug auf die Genauigkeit. Aus der

spezifischen Bewegungsführung des fünfachsiggen Fräsens resultieren unpräzise berechnete Ausgleichsbewegungen, die sich zusätzlich negativ auswirken können. Wie Bild 1.2 zeigt, nimmt der Präzisionsverlust somit überproportional zu.

Die Realisierung hoher Maschinengenauigkeiten durch eine hochpräzise Fertigung und Montage der einzelnen Maschinenkomponenten ist auf Grund signifikant zunehmender Produktionskosten wirtschaftlich nicht sinnvoll. Um die Genauigkeiten der Maschinen zu optimieren und auch im Laufe der Betriebsdauer aufrecht zu erhalten, werden die Achsfehler stattdessen zunächst durch eine messtechnische Kalibrierung ermittelt und anschließend durch Korrekturfunktionen innerhalb der Maschinensteuerung korrigiert [SCHW08]. Die verfügbare Kalibriertechnologie ist jedoch überwiegend auf einzelne Maschinenachsen oder Verbünde mit bis zu drei Achsen fokussiert. Bild 1.2 veranschaulicht hierzu, dass die Menge der Technologien, die eine durchgängige Kalibrierung des gesamten Achssystems ermöglichen, bei zunehmender Anzahl an Maschinenachsen signifikant abnimmt. Die vollständige messtechnische Kalibrierung fünfachsigger Maschinen erfordert somit die sequentielle Anwendung verschiedener Verfahren und Messmittel. Hieraus resultieren zum einen hohe instrumentelle Aufwände. Zum anderen erfordert die Anwendung der verschiedenen Messmittel und Verfahren in Fünfachmaschinen verhältnismäßig deutlich mehr Zeit als bei Dreiachsmaschinen. Zusätzlich folgt ein weiterer zeitlicher Mehraufwand aus der genannten größeren Anzahl an Achsfehlern. Schließlich resultieren, wie Bild 1.2 zeigt, für fünfachsigge Werkzeugmaschinen Optimierungsprozesse, die durch einen sprunghaften Anstieg des Zeitaufwands gekennzeichnet sind.

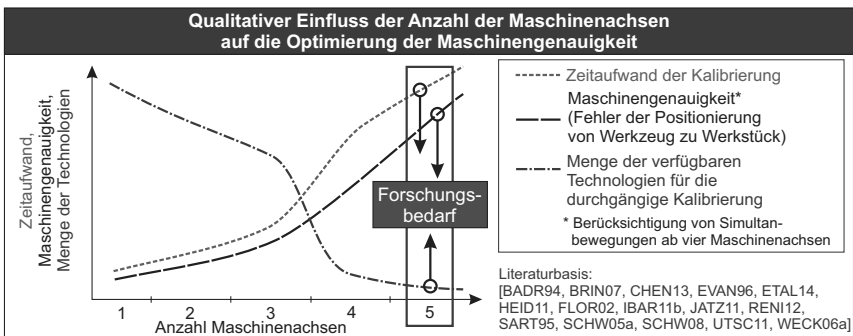


Bild 1.2: Herausforderungen der Optimierung fünfachsigger Maschinen

Challenges for the Optimization of five-axis Machines

Zur Reduktion der Aufwände werden daher häufig nur Teilmengen der Achsfehler ermittelt und korrigiert. Einerseits kann es dadurch zu erheblichen Diskrepanzen zwischen den erwarteten und den realen Form- und Lagefehlern am Werkstück kommen, da die Fertigungsgenauigkeit aus der Summe aller Achsfehler resultiert. Andererseits muss eine Maschine aber nicht genauer sein, als die Produktionsprozesse es erfordern. Der Umfang der Optimierung könnte daher auf eine begrenzte Menge an Fehlern reduziert werden, durch deren Korrektur die geforderte Maschinengenauigkeit erreicht wird. Die Herausforderung ist dabei, eine möglichst kleine Menge an

Fehlern zu definieren, die eine große Wirkung auf die Genauigkeit haben. In diesem Zusammenhang mangelt es an Untersuchungen, in denen die quantitative Wirkung der einzelnen Achsfehler auf die Fertigungsgenauigkeit thematisiert wird.

Folglich besteht Forschungsbedarf in Bezug auf Lösungen zur Optimierung fünfachsigter Fräsmaschinen bei deutlich reduziertem zeitlichen und instrumentellen Aufwand und unter Berücksichtigung der technisch erforderlichen Genauigkeitssteigerung. Ansätze zur Optimierung fünfachsigter Fräsmaschinen finden sich zum einen im Bereich der universitären Forschung. Allerdings konzentrieren sich diese Ansätze, ähnlich wie zuvor genannt, häufig nur auf Teilmengen der auftretenden Achsfehler ohne den Zusammenhang zur Wirkung dieser Fehler konkret zu betrachten. Zum anderen entwickeln auch einzelne Maschinenhersteller eigene Verfahren zur Optimierung ihrer Fünfachsmaschinen. Diese sind jedoch zum Teil maschinenspezifisch und nur im Zusammenhang mit dem Kauf der betreffenden Maschinen verfügbar.

Mit der vorliegenden Arbeit soll demzufolge ein Beitrag zur Realisierung von Optimierungsprozessen für fünfachsigte Fräsmaschinen geleistet werden, mit denen die erforderliche Steigerung der Genauigkeit unter reduzierten Aufwänden erreicht werden kann. Im Vordergrund der wissenschaftlichen Arbeiten stehen zwei übergeordnete Fragestellungen: Inwiefern können Strategien zur effizienten Durchführung der Optimierung realisiert werden, mit denen die erforderliche Steigerung der Maschinengenauigkeit durch die Behandlung möglichst weniger Fehler ermöglicht wird? Wie kann eine durchgängige und zügige Ermittlung dieser relevanten Achsfehler auf Basis verfügbarer Messmittel erreicht werden? Die wissenschaftlichen Arbeiten sind dazu in die folgenden Teilaspekte gegliedert:

- Ausarbeitung einer Systematik zur Modellierung der geometrischen Maschinengenauigkeit fünfachsigter Fräsmaschinen als Basis für die folgenden Arbeiten
- Ausarbeitung von Strategien zur effizienten Durchführung der Optimierung der Maschinengenauigkeit mit dem Ziel die erforderlichen Steigerung der Maschinengenauigkeit durch die Behandlung möglichst weniger Fehler zu erreichen
- Realisierung eines modellbasierten Kalibrierverfahrens zur durchgängigen und aufwandreduzierten Ermittlung der relevanten Fehler der Maschinenachsen
- Simulative, mess- und fertigungstechnische Qualifizierung der Strategien bezüglich Effizienz, Zuverlässigkeit und Übertragbarkeit auf die Werkstückbearbeitung
- Simulative und messtechnische Qualifizierung des Kalibrierverfahrens in Bezug auf die Kalibriergenauigkeit und den Zeitaufwand

Neben der Beantwortung der übergeordneten Fragestellungen eröffnen die Ergebnisse dieser Arbeit neue Perspektiven für die weitere Forschung im Bereich der Kalibrierung und Korrektur serieller und mehrachsiger Maschinen.