

1 Einleitung

In den letzten Jahren sind die Anforderungen an die Fertigungsanwendungen von der Automobilindustrie bis zur Luft- und Raumfahrt, von großen Turbinen für Flugzeuge über medizintechnische Miniaturgeräte, von täglichen Reparaturwerkzeugen bis zu wissenschaftlichen Forschungsinstrumenten erheblich angestiegen. Hierbei beeinflusst die Fertigungsgenauigkeit nicht nur die Qualität und Effizienz der Produkte, sondern wirkt sich auch auf die Sicherheitsmerkmale aus.

In der Produktionstechnik werden zur Fertigung präziser und komplexer Werkstücke überwiegend fünfachsige Werkzeugmaschinen eingesetzt. Diese zeichnen sich gegenüber dreiachsigem Werkzeugmaschinen durch eine bessere Automatisierbarkeit bzw. Zugänglichkeit der Werkstücke aus, indem komplexe Bauteilgeometrien ohne Umspannen gefertigt werden können. Allerdings bestehen fünfachsige Werkzeugmaschinen aufgrund der zusätzlichen Achsen aus mehr Maschinenkomponenten. Daher weisen sie eine höhere Komplexität auf, was die Herausforderungen an die Konstruktion, die Steuerung und das Erreichen einer hohen Genauigkeit im Vergleich zu dreiachsigem Werkzeugmaschinen erhöht.

Jede Werkzeugmaschine weist aufgrund der geometrischen Toleranzen sowie der thermischen und dynamischen Eigenschaften der Maschinenkomponenten individuelle Fehler auf, die häufig zu großen Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung der Werkstücke führen. Insgesamt sind bis zu 75% der geometrischen Abweichungen der Werkstücke auf thermo-elastische Strukturverformungen zurückzuführen [MAYR12]. Die Beherrschung der thermo-elastischen Verformungen bietet somit ein enormes Potential, die Genauigkeit von Werkzeugmaschinen zu erhöhen und damit den Anforderungen der Industrie gerecht zu werden.

Nach dem aktuellen Stand der Technik existieren bereits Ansätze zur Modellierung thermo-elastischer Abweichungen. Jedoch wurden die Modellierungsmethoden meistens für Linearachsen, Drehmaschinen sowie dreiachsigem Werkzeugmaschinen durchgeführt. Die thermo-elastischen Abweichungen von fünfachsigen Werkzeugmaschinen können hingegen bisher nur mit großem Mehraufwand modelliert werden, da die Messmethoden oft durch die begrenzte Anzahl messbarer Abweichungen eingeschränkt sind und/oder sich die geometrischen Abweichungen der fünfachsigen Kinematik nicht innerhalb einer kurzen Zeit messen lassen. Mit den meisten Ansätzen ist es dadurch nicht möglich, die thermo-elastischen Abweichungen im gesamten Arbeitsraum der fünfachsigen Werkzeugmaschine volumetrisch zu modellieren.

Eine neue Messmethode, der dynamische R-Test, hat das Potenzial, innerhalb einer kurzen Zeit die geometrischen Abweichungen im gesamten Arbeitsraum fünfachsiger Werkzeugmaschinen zu erfassen. Dabei werden Messkugeln auf dem Arbeitstisch der Maschine befestigt. Über den Arbeitsraum verteilt wird entlang verschiedener Maschinenbewegungen der Abstand zu den Messkugeln mittels eines Abstandssensors am Tool-Center-Point (TCP) gemessen. Mit Hilfe eines kinematischen Modells kann dann auf die Abweichungen der einzelnen Achsen geschlossen werden. Der wesentliche

Unterschied zur bisherigen Messmethode, dem statischen R-Test, besteht darin, dass beim dynamischen R-Test die Messdaten kontinuierlich während der dynamischen Bewegung der Maschine aufgenommen werden. Diese Methode reduziert die Messdauer erheblich, sodass die Messung potentiell eine Momentaufnahme des Maschinenzustandes liefert, die für die Analyse des thermo-elastischen Verhaltens verwendet werden kann. Allerdings müssen die Messdaten mit einer geeigneten Methode zu den zugehörigen Positionen der Achsen synchronisiert werden, was eine zusätzliche Unsicherheit darstellt. Außerdem stellt die dynamische Bewegung der Maschine durch auftretende Nichtlinearitäten eine weitere Unsicherheitsquelle dar.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Messmethode des dynamischen R-Tests sowie ein entsprechender Messprozess einschließlich der Erfassungsmethode der Positions- und Messdaten entwickelt und optimiert. Basierend auf der simulativen sowie experimentellen Analyse wird die Messunsicherheit des Messprozesses bestimmt, der aufgrund seiner kurzen Messdauer eine volumetrische Momentaufnahme der thermo-elastischen Abweichungen ermöglicht. Der entwickelte Messprozess wird zunächst an einer fünfachsigen Werkzeugmaschine angewendet. Unter verschiedenen Belastungen der Achsen sowie Abkühlvorgängen wird der Messprozess wiederholt eingesetzt, um das Verhalten dieser Werkzeugmaschine zu messen und zu analysieren. Anschließend wird mit den gemessenen thermo-elastischen Abweichungen sowie den Temperaturdaten und steuerungsinternen Daten der Maschine ein Modell basierend auf PT1-Transferfunktionen parametriert, mit dem das thermo-elastische Verhalten vorhergesagt werden kann. Die Qualität der Modellierung wird mit unabhängigen Messdatensätzen validiert.

Die nach dem Stand der Technik bekannten Mess- und Modellierungsmethoden thermo-elastischer Abweichungen, sowie die in dieser Arbeit verwendeten mathematischen Methoden werden in Kapitel 2 beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 3 die Forschungsfrage formuliert, die in dieser Arbeit beantwortet werden soll. Die Grundlagen der in dieser Arbeit verwendeten Messmethode geometrischer bzw. thermo-elastischer Abweichungen von Werkzeugmaschinen sowie der phänomenologischen Modellierungsmethode werden in Kapitel 4 beschrieben. Der Messprozess wird in Kapitel 5 für eine Werkzeugmaschine entwickelt und sowohl simulativ als auch experimentell validiert. In Kapitel 6 wird der Messprozess dann zur Analyse und Modellierung des thermo-elastischen Verhaltens der Maschine eingesetzt. Hier werden die Ergebnisse sowie das Potential des entwickelten Messprozesses analysiert. In Kapitel 7 wird der Messprozess an einer weiteren fünfachsigen Werkzeugmaschine getestet, um die grundsätzliche Übertragbarkeit zu validieren. Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Untersuchungen gegeben.

Introduction

In recent years, the demands on manufacturing applications have increased considerably, from the automotive industry to aerospace, from large turbines for aircraft to miniature medical devices, and from daily repair tools to scientific research instruments. Especially, The manufacturing accuracy not only influences the quality and efficiency of the products, but also has a direct impact on safety requirements.

In production engineering, the five-axis machine tools are used predominantly for the manufacture of precise and complex workpieces. Compared to three-axis machine tools, they have great advantages in automation capability and workpiece accessibility, as complex component geometries can be manufactured without reclamping. However, five-axis machine tools consist of more machine components due to the additional axes. Therefore, they have a higher complexity, which increases the challenges for design, control and achieving high accuracy compared to three-axis machine tools.

Each machine tool has individual errors due to the geometric tolerances and the thermal and dynamic properties of the machine components, which often lead to large inaccuracies in the machining of the workpieces. Overall, up to 75% of the geometric deviations of the workpieces can be traced back to thermo-elastic deformations [MAYR12]. The control of thermo-elastic deformations thus offers enormous potential to increase the accuracy of workpieces and to meet the requirements of the industry as well.

According to the current state of the art, approaches for modelling thermo-elastic deviations already exist. However, the modelling methods have mostly been carried out for linear axes, turning lathes and three-axis machine tools. The thermo-elastic deviations of five-axis machine tools, on the other hand, can so far only be modelled with great additional effort, since the measurement methods are often restricted by the limited number of measurable geometric errors and/or these errors of five-axis kinematics cannot be measured within a short time. As a result, it is not possible with most approaches to model the thermo-elastic errors volumetrically in the entire working volume of the five-axis machine tool.

A new measurement method, the dynamic R-Test, has the potential to measure the geometric errors in the entire working volume of five-axis machine tools within a short time. Measuring balls are attached to the work table of the machine. Distributed over the workspace, the distance to the measuring balls is measured along different machine movements by means of a distance sensor at the tool centre point. With the help of a kinematic model, each geometric error of the individual axes can then be calculated. The essential difference of the dynamic R-Test from the previous measurement method, i.e., the static R-Test, is that the measurement data is recorded continuously during the dynamic movement of the machine. Thus, this method significantly reduces the measurement duration so that the measurement potentially provides a snapshot of the machine state which can be used for the analysis of the thermo-elastic behaviour. However, the sensor data must be synchronised to the corresponding positions of the

axes using a suitable method, which represents an additional uncertainty. Furthermore, the dynamic movement of the machine is, due to occurring non-linearities, another source of uncertainty.

Within the scope of this thesis, a measurement method of the dynamic R-Test as well as a corresponding measurement process including the data acquisition method of the position and sensor data are developed and optimized. Based on the simulative and experimental analysis, the measurement uncertainty of the measurement process is determined, which enables a volumetric snapshot of the thermo-elastic errors due to its short measurement duration. The developed measurement process is first applied to a five-axis machine tool. Under different loads on the axes and cooling processes, the measurement process is used repeatedly to measure and analyse the behaviour of this machine tool. Subsequently, a model based on PT1 transfer functions is parametrized using the measured thermo-elastic errors as well as the temperature data and controller-internal data of the machine tool, with which the thermo-elastic behaviour can be predicted. The quality of the modelling is validated with independent measurement data sets.

The known state-of-the-art measurements and modelling methods of thermo-elastic errors, as well as the mathematical methods used in this thesis, are described in Chapter 2. Subsequently, in Chapter 3, the research hypotheses are formulated, which are to be answered in this thesis. The basics of the methods to measure geometric and thermo-elastic errors of machine tools used in this thesis as well as the phenomenological modelling method are described in Chapter 4. The measurement process is developed for a machine tool in Chapter 5 and validated both with simulation and experiments. In Chapter 6 the measurement process is then used to analyse and model the thermo-elastic behaviour of the machine tool. Here the results and the potential of the developed methods are discussed. In Chapter 7, the developed methods are applied to another five-axis machine tool to validate the basic transferability. Finally, the summary of the work and an outlook for further investigations are given in Chapter 8.