
1 Einleitung

Introduction

Neben dem statischen und dynamischen Verhalten bildet das thermo-elastische Verformungsverhalten die dritte Komponente der lastabhängigen Einflussfaktoren auf die Bearbeitungsgenauigkeit spanabhebender Werkzeugmaschinen [BREC17b]. Trotz der jahrzehntelangen Erforschung der zugrundeliegenden Kausalität und der Entwicklung eines breiten Spektrums an Gegenmaßnahmen stellen thermo-elastische Effekte Anwender noch heute vor große Herausforderungen. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) verfügen häufig weder über das notwendige Know-how noch über das richtige Equipment, um wirkungsvolle Gegenmaßnahmen eigenständig umsetzen zu können. Neben der theoretischen Wirksamkeit einer möglichen Gegenmaßnahme ist in produzierenden Unternehmen immer die praktische Realisierbarkeit von zentraler Bedeutung und entscheidend für die Frage, ob eine Verbesserung des thermo-elastischen Maschinenverhaltens tatsächlich erzielt werden kann.

In modernen Werkzeugmaschinen werden aus diesem Grund bereits durch den Hersteller unterschiedliche Maßnahmen vorgesehen, um die Auswirkungen unerwünschter thermo-elastischer Verlagerungen möglichst zu minimieren. Die gezielte Temperierung von Strukturbauten mithilfe von aktiven Kühlssystemen ist ein Beispiel, welches in kommerziellen Maschinensystemen vorzufinden ist. Da der Betrieb aktiver Kühlssysteme heutzutage aber praktisch entkoppelt von der Intensität der Maschinennutzung ist, können die theoretisch verfügbaren Potenziale oft nicht abgerufen werden. Darüber hinaus tragen aktive Kühlssysteme in nicht unerheblichem Maße zur elektrischen Leistungsaufnahme eines Fertigungssystems bei und wirken sich damit negativ auf den ökologischen Fußabdruck der Fertigung aus.

Die Biologisierung der Produktion verfolgt das Ziel, der Natur entlehnte Konzepte auf die Produktionstechnik zu übertragen. Diesem Leitgedanken folgend lässt sich für die oben beschriebene Problemstellung die Forderung einer homiothermen bzw. gleichwarmen Werkzeugmaschine aufstellen. Gleichwarmen Lebewesen gelingt es mithilfe verschiedener Mechanismen, die Körperkerntemperatur weitestgehend losgelöst von den Umwelt- und Lebensbedingungen auf einem nahezu konstanten Niveau zu halten. Wirkungsvolle Stellmechanismen zur Beeinflussung des thermischen Haushalts und ein robustes Regelungskonzept bilden dafür die Grundlage. Übertragen auf die Werkzeugmaschine ergibt sich das Potenzial, aktive Kühlssysteme bedarfsgerecht einzusetzen, um thermo-elastische Verlagerungen einerseits und die im Aggregat umgesetzte elektrische Energie andererseits zu minimieren.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Entwicklung einer am Bedarf der Werkzeugmaschine ausgerichteten Regelungsarchitektur für den Einsatz der aktiven Kühlssysteme. Durch die zeitliche und räumliche Homogenisierung des thermischen Maschinenverhaltens sol-

len thermo-elastisch induzierte Verlagerungen am Tool Center Point (TCP) in der Betriebsphase reduziert werden.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen zweier Forschungsverbundprojekte, an welchen der Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen mitwirkte. Das Teilprojekt B03 des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten, transregionalen Sonderforschungsbereichs *SFB/TR 96* (Projektnummer 174223256) befasste sich mit der Analyse und Simulation des thermo-elastischen Verhaltens von Werkzeugmaschinenkomponenten und -baugruppen. Im Vorstandsvorhaben *BioMANU III* der Fraunhofer-Gesellschaft stand die Biologisierung im Werkzeugmaschinenbau im Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten. Beide Verbundprojekte wurden im Jahr 2023 erfolgreich abgeschlossen.

Introduction

In addition to the static and dynamic behavior, the thermoelastic deformation behavior represents the third component of load-dependent influencing factors on the machining accuracy of metal-cutting machine tools [BREC17b]. Despite decades of research into the underlying causality and the development of a wide range of countermeasures, thermoelastic effects still pose major challenges to users today. Small and medium-sized enterprises (SMEs) in particular often have neither the necessary know-how nor the right equipment to implement effective countermeasures on their own. In addition to the theoretical effectiveness of a possible countermeasure, the practical feasibility is always of central importance in manufacturing companies and decisive for the question of whether an improvement in thermoelastic machine behavior can actually be achieved.

For this reason, modern machine tools are already equipped with various measures by the manufacturer to minimize the effects of undesirable thermoelastic displacements. An active temperature manipulation of structural components by the use of active cooling systems is one example that can be found in commercial machine systems. However, since the operation of active cooling systems is nowadays practically decoupled from the intensity of machine use, the theoretically available potentials often cannot be exploited. In addition, active cooling systems contribute to a not inconsiderable extent to the electrical power consumption of a manufacturing system and thus have a negative impact on the ecological footprint of manufacturing.

The biologization of production pursues the goal of transferring concepts borrowed from nature to production technology. Following this principle, the requirement of a homoiothermic machine tool can be formulated for the problem described above. With various mechanisms, homoiothermic organisms are able to maintain their core body temperature at an almost constant level, largely independent of environmental and living conditions. Effective control mechanisms for influencing the thermal balance and a robust control concept form the basis for this. Transferred to the machine tool, this results in the potential to use active cooling systems to minimize thermoelastic displacements on the one hand and the electrical power consumption on the other hand.

Therefore, the objective of the present work is the development of a control architecture for active cooling systems taking into account the actual demand of the machine tool. The temporal and spatial homogenization of the thermal machine behavior is intended to reduce thermoelastically induced displacements at the Tool Center Point (TCP) during the operating phase.

The present work was developed within the framework of two joint research projects in which the Chair of Machine Tools of the Laboratory for Machine Tools and Production Engineering

(WZL) of RWTH Aachen University participated. The subproject B03 of the transregional collaborative research center *CRC/TR 96* (project number 174223256), funded by the German Research Foundation (DFG), dealt with the analysis and simulation of the thermoelastic behavior of machine tool components and assembly groups. In the Fraunhofer Society board project *BioMANU III*, the scientific work focused on biologization in machine tools. Both joint projects were successfully completed in 2023.