

# 1 Einleitung

*Das Herzstück einer Werkzeugmaschine ist die Hauptspindel. Ihre Antriebsleistung zusammen mit den Schneidstoffen bestimmt maßgeblich die Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine.*

---

BUTZ [BUT07, S. 27]

Deutschland hat mit 13 % direkt nach China den zweitgrößten Anteil an der weltweiten Werkzeugmaschinenproduktion [STA24a]. Mit einem Umsatz von 22,9 Mrd. € war der Werkzeugmaschinenbau auch der stärkste Sektor des deutschen Maschinenbaus im Jahr 2023 [STA24b]. Die Wettbewerbsfähigkeit kann nur durch die im Eingangszitat beschriebene hohe Leistungsfähigkeit der Maschine, die primär durch deren Hauptspindel determiniert wird, sichergestellt werden.

Durch eine Erhöhung der Schnittleistung lässt sich direkt der Hauptzeitanteil des Produktionsprozesses reduzieren bzw. die Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine steigern. Die Folge dieses Bestrebens ist der Wunsch nach immer höheren Drehzahlen und Drehmomenten der Hauptantriebe [ABE10, S. 782]. Diese Entwicklung führte dazu, dass sich direktgetriebene Spindeln zügig als bevorzugte Antriebsart von Werkzeugmaschinen durchsetzten [GEB97, S. 2]. Direktgetriebene Spindeln ermöglichen fünf- bis zehnmal höhere Schnittgeschwindigkeiten und Arbeitsvorschübe gegenüber fremdgetriebenen Spindeln [SCH94].

Die hohe Dynamik wird durch das Integrieren des Elektromotors in die Baugruppe erreicht, weswegen direktgetriebene Spindeln auch als Motorspindeln bezeichnet werden. Fortwährende Produktivitätssteigerungen führten dazu, dass die Spindeln inzwischen an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit betrieben werden. Motorspindeln wurden so auch zu kritischen Komponenten, die die Maschinenverfügbarkeiten durch deren Zuverlässigkeit determinieren [BUT07, S. 27]. Durch die hohen Drehzahlen entstehen sowohl signifikante fliehkraftbedingte als auch thermische Belastungen. Infolgedessen bestimmt die Komponente jedoch auch die erreichbare Arbeitsgenauigkeit der Werkzeugmaschine, die durch die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück bestimmt wird [GEB97, S. 2]. Etwaige Störeinflüsse, die eine Relativbewegung zur Folge haben, bilden sich direkt auf dem Werkstück ab.

Die Relativbewegung infolge von Störeinflüssen wird in jüngeren Arbeiten auch als Tool-Center-Point-Verlagerung (TCP-Verlagerung) bezeichnet [BRE14, S. 491]. Die TCP-Verlagerung von Werkzeugmaschinen hat geometrische, statische, dynamische und thermische Ursachen [PUT19]. Der thermische Einfluss ist dominant und führt, je nach Studie, zu 50 % [WEC95, S. 589], 57 % [PUT18, S. 5] bis hin zu 75 % [MAY12, S. 771] der Gesamtverlagerung. Die Motorspindel wird dabei als kritische Komponente bzw. Hauptverursacher betrachtet [BRY90, S. 652; CHE95, S. 1402; DEN18, S. 1]. Das kann mit der großen Verlustleistung von Motorspindeln [DEN11, S. 348] und der räumlichen Nähe zum TCP begründet werden. Darüber hinaus kann die thermische Verlagerung der Spindel, gegenüber den übrigen thermisch wirkenden Komponenten der Werkzeugmaschine, nicht fortlaufend im Betrieb mit Glasmaßstäben überwacht werden.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Reduktion der spindelseitigen TCP-Verlagerung. Der dominierende thermisch induzierte Anteil der Verlagerung liegt dabei im Fokus. Die thermische Verlagerung wird erstmal ursachenspezifisch reduziert. Soweit möglich, soll deren Auftreten durch Konstruktionsoptimierungsansätze *vermieden* werden. Der nicht vermeidbare Anteil der Verlagerung wird im Betrieb *kompensiert*.

Dahingehend wird zunächst der Aufbau von Motorspindeln erläutert. Um die thermisch induzierte Verlagerung vermeiden bzw. kompensieren zu können, müssen die thermomechanischen Wirkzusammenhänge verstanden werden. Das gelingt durch das Aufzeigen der Wärmetransfermechanismen und in der Literatur vorhandener thermischer Spindelmodelle. Die Darstellung des Standes der Technik wird durch das Darlegen der unterschiedlichen Ansätze zur TCP-Verlagerungsreduktion (*vermeiden*, *vermindern*, *kompensieren*) abgeschlossen.

Im Anschluss wird der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, hybride Ansatz zur Reduktion der TCP-Verlagerung vorgestellt. Die Erprobung und Umsetzung erfolgt auf Basis von thermisch-fluidmechanisch gekoppelten Modellen. Radial- und Winkelverlagerung am TCP können durch thermosymmetrisches Konstruieren *vermieden* werden. Ein dafür erforderlicher Ansatz zur Quantifizierung thermoasymmetrischer Temperaturfelder wird dahingehend hergeleitet. Das *Kompensieren* der axialen Verlagerung, die stets in Folge der Wärmedehnung auftritt, gelingt durch datenbasierte Ersatzmodelle, die mit den Methoden der künstlichen Intelligenz aufgestellt werden.