

Thermische Simulation von Werkzeugmaschinen zur Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit

Thermal Simulation of Machine Tools for the Advancement of Production Accuracy

Jörg Franke, Alexander Kühl, Nestor Andres Arteaga Martin
Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS, Erlangen (Germany)
franke@faps.uni-erlangen.de, kuehl@faps.uni-erlangen.de,
arteaga@faps.uni-erlangen.de

Abstract: Higher engine and cutting performance along with an increase in the use of driven tools have led to an increment in thermal related deformation in machine tools. By combining a CFD (computational fluid dynamics) and a FEM (finite elements method) simulation it is possible to evaluate the thermal behavior and to quantify the thermal and mechanical induced strain in the machine, thus opening new possibilities for tool-center-point compensation approaches.

1 Überblick

Moderne Werkzeugmaschinen stellen hochkomplexe mechatronische Produktionssysteme dar, deren Entwicklung von einem enormen Innovations-, Zeit- und Kostendruck geprägt ist. Zeitlich variante und lokale Temperaturfelder führen auf Grund der mechanischen Eigenschaften der Maschinenstruktur zu Verformungen und damit zu einer Verlagerung des Wirkeingriffspunktes des Werkzeuges. Dieses Verhalten lässt sich auf Grund der Inhomogenität der Temperatur nur mittels aufwendiger und komplexer Berechnungen näherungsweise vorhersagen. Nachdem im vergangenen Jahrzehnt die Fertigungsgenauigkeiten von Werkzeugmaschinen in den Mikrometerbereich verbessert werden konnten (WECK, BRECHER 2006, S. 2), rückt auf Grund des hohen Kosten-, Leistungs- und Genauigkeitsdrucks vor allem der Fehler durch thermisch bedingte Verlagerungen immer weiter in den Fokus des Werkzeugmaschinen-Entwicklers.

Deutlich wird dies vor allem auch an Hand der Normen, die in den vergangenen Jahren zu diesem Thema erarbeitet wurden. Neben diversen anwendungsspezifischen Normen wurde die ISO 230, welche sich mit der Prüfung von CNC-Maschinen beschäftigt, bis 2007 um einen Teil, der sich der Ermittlung thermischer Effekte annimmt, erweitert (ISO 230-3).

Um thermische Fehler zu minimieren, sollte entweder bereits in den frühen Phasen des Konstruktionsprozesses versucht werden, auf thermomechanische Eigenschaften des Gesamtsystems einzugehen oder Kompensationen an der Maschine zu applizieren. Um den Aufwand und die Kosten für die genannten Maßnahmen zu verkleinern, nimmt, wie in vielen anderen technischen Bereichen, der Einsatz der Simulationstechnik zur Früherkennung zukünftiger Produkteigenschaften, darunter im besonderen Maße des thermischen Verhaltens, eine Schlüsselstellung ein. Bei der Analyse von Werkzeugmaschinen sind die mechanischen und die thermischen Eigenschaften gemeinsam zu betrachten. In den vergangenen Jahren wurde hierbei nach messtechnischer Untersuchung der Maschinen einerseits versucht, die Werkzeugmaschine (NEUGEBAUER, ZEINGENBERGER, KEHL 2009; GLEICH 2008) und den Prozess (GROßMANN, JUNGNICHEL 2008) möglichst genau in Computermodellen nachzubilden, während andererseits geeignete Regelungen für den Prozess gestaltet wurden (GROßMANN, JUNGNICHEL 2006).

Mittels eines multidisziplinären Ansatzes auf Grundlage der Methode der finiten Elemente unter Einbeziehung mechanischer, elektrischer sowie informationstechnischer Komponenten können wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich eines thermisch verbesserten Aufbaus einer Werkzeugmaschine gewonnen werden. Daraus können z.B. Hinweise zur Anordnung der Messsysteme oder der Sensorik abgeleitet und Kompensationsstrategien implementiert werden.

2 Motivation und Vorgehen bei einer multidisziplinären Betrachtungsweise

Der thermische Einfluss verursachte in den vergangenen Jahren einen immer größer werdenden Anteil am Gesamtfehler. Auf Grund der Abhängigkeit von vielfältigen Einflussfaktoren, wie zum Beispiel den Umgebungsbedingungen (WECK, BRECHER 2006, S. 181 ff.), ist es in den Phasen der Maschinenentwicklung und -konstruktion nicht möglich, die Einflüsse des Wärmegangs auf die Maschine umfassend einzuschätzen und zu berücksichtigen. Die Entwicklung eines effektiven Werkzeuges zur Untersuchung thermisch bedingter Ungenauigkeiten erfordert daher, neben der frühen Ergebnissrückführung, vor allem die Betrachtung möglichst vieler Randbedingungen.

Die ausgetauschten Wärmemengen werden grundsätzlich auf drei verschiedene Arten übertragen und sind dementsprechend in Wärmestrahlung, Konvektion (freie und erzwungene) und Wärmeleitung zu unterteilen. Alle drei physikalischen Wärmeübertragungsmechanismen sind durch mathematische Gleichungen beschreibbar. Bei der Berechnung gilt es zu beachten, dass die Temperaturfelder skalare Größen sind, d. h. jedem Raumpunkt wird eine Temperatur zugeordnet.

Basierend auf einer durchgehenden Kette von Simulationswerkzeugen (Abb. 1) sollen die Ergebnisse der Analyse des thermischen und dynamischen Verhaltens der Gesamtkonstruktion Werkzeugmaschine den Konstrukteur bereits in frühen Stadien der Entwicklung dabei unterstützen, Maßnahmen zur Verminderung thermoelastischer Verformungen zu ergreifen. Die Zielstellung eines Verbundprojekts zwischen dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb; Technische Universität München) und dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS; Universität Erlangen-Nürnberg) liegt somit in der

grundlegenden Verbesserung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen zur Verringerung temperaturbedingter Abweichungen. Dabei erfolgt auf Basis der Simulationsergebnisse die Erörterung von konstruktiven Maßnahmen und Kompensationsmöglichkeiten zur Erreichung einer höheren Genauigkeit. Das Vorgehen untergliedert sich in die folgenden Schritte: Zunächst wird eine simulationsgestützte Methode entwickelt, mit welcher der Wärmegang von Werkzeugmaschinen berechnet werden kann. Anhand dieser sind potentielle Wirkzusammenhänge festzustellen und an ausgewählten Demonstratoren nachzuvollziehen, so dass geeignete Kompensationsparameter ermittelt werden können. Zusätzlich erfolgt die Integration in den Entwicklungsprozess mittels wiederverwendbarer Modelldaten. Besonderes Augenmerk liegt auch auf der Übergabe der Simulationsergebnisse. Die Ergebnisse aus der numerischen Strömungssimulation werden der Simulation der dreidimensionalen Temperaturverteilung als Eingangsparameter übergeben, mit welcher der Wärmegang und die Wirkpunktverlagerung berechnet werden kann.

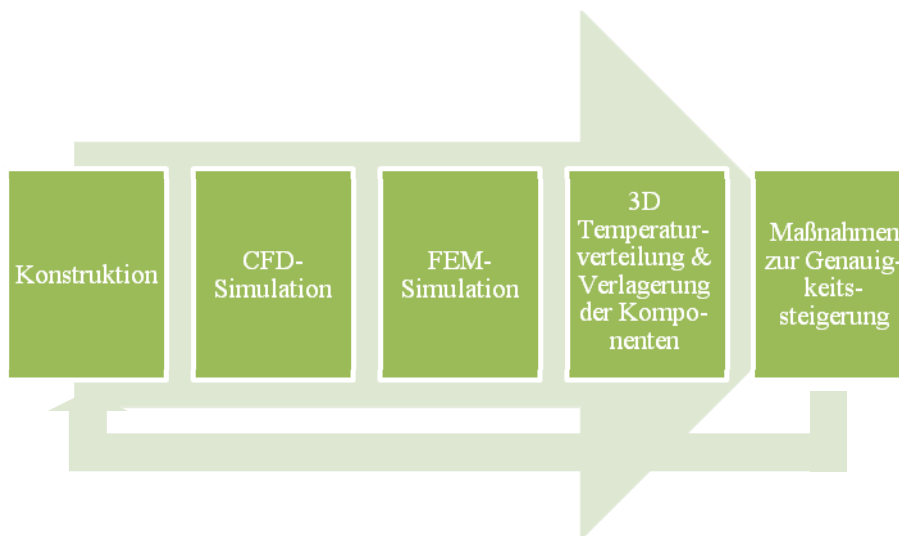


Abbildung 1: Multidisziplinärer Simulationsansatz

3 Messtechnische Erfassung des Wärmegangs an Werkzeugmaschinen zur Validierung der Simulationsergebnisse

Zur Erfassung der Erwärmung, zur Abschätzung der Auswirkung auf die Verschiebungen in der Werkzeugmaschine und zur späteren Validierung der Ergebnisse aus den Simulationen, wurde zu Beginn des Projekts eine ausführliche Messreihe an Demonstratoren durchgeführt. Im Folgenden werden die Messergebnisse der am Lehrstuhl FAPS untersuchten Fräsmaschine DMG DMU 35 M der Firma Gildemeister dargestellt. Zunächst wurde der Temperaturverlauf auf Basis der Thermografie aufgenommen (Abb. 2). Diese Methode lieferte den ersten Überblick der Temperaturverteilung und Temperaturverläufe über die Oberfläche der Maschine. An einzelnen Punkten erfolgte die Temperaturmessung mit Hilfe von zusätzlichen

taktilen Sensoren. Die Erfassung der Position des Tool Center Points erfolgte einerseits durch ein Laser-Triangulationsmesssystem, welches außerhalb der Maschine aufgebaut war, andererseits durch Messuhren, welche fest auf dem Bearbeitungstisch appliziert wurden. Der Einfluss des Zerspanprozesses auf die Erwärmung wurde während der Messungen zunächst nicht berücksichtigt.

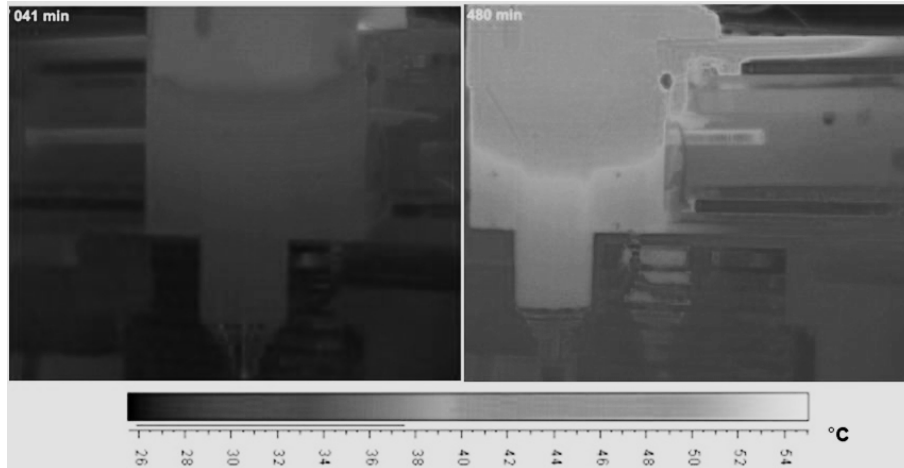


Abbildung 2: Thermografieaufnahme der x-Achse mit Spindel nach 41 min und 480 min Laufzeit

Um möglichst realitätsnahe Messergebnisse zu erhalten, wurde ein Probewerkstück gestaltet, dessen Herstellung mit maschinentypischen Bearbeitungsaufgaben (Planfräsen, Bohren) verbunden ist. Bei der Gestaltung des Bauteils wurde darauf geachtet, dass eine möglichst gleichmäßige Belastung der einzelnen Achsen entsteht. Der Probekörper entsteht durch das Fräsen von zwei Rechtecktaschen und dem Bohren von zwei Lochvollkreisen. Zwischen den einzelnen Zerspanvorgängen wurde in Eilganggeschwindigkeit (5000 mm/min Vorschubgeschwindigkeit) verfahren. Die Eilgangfahrten sowie die Bearbeitung der beiden Rechtecktaschen dienen der Erwärmung der energiewandelnden und -übertragenden Elemente in der x- und y-Achse.

Die Fertigung der beiden Lochkreise mit jeweils sechs Bohrungen bewirkt eine Erwärmung der Komponenten in der z-Achse. Unmittelbar nach der Bearbeitung findet die Messung der Position statt. Durch diese ca. 120 Sekunden dauernde Messung wird gleichzeitig die Rüstzeit im Arbeitsablauf berücksichtigt.

Zur Absicherung der Ergebnisse wurde die Messung mehrmals wiederholt. Zwischen den Messungen wurde eine ausreichende Pause eingehalten, so dass die Maschine wieder in den abgekühlten Beharrungszustand gelangen konnte. Die Messungen an der DMU 35 M zeigen, dass sich nach ca. 8 h ein angenäherter, erwärmter Beharrungszustand einstellt. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, steigt die Spindeltemperatur nach ca. 4 h bereits um ca. 15 °C. Im weiteren Verlauf der Messung kommt es zu keiner weiteren signifikanten Steigung. Die Hauptwärmequellen stellen erwartungsgemäß die Hauptspindel sowie die Lager der Kugelgewindetriebe dar. Bei der Analyse der Längenmessung zeigt sich, dass es nicht nur auf Grund der

Spindelerwärmung zu einer Verschiebung des Tool Center Points kommt, sondern dass auch der Bearbeitungstisch einem thermischen Drift unterliegt. In den aufgenommenen Messreihen ergibt sich durch die gleichen Vorzeichen der beiden Effekte eine, in Bezug auf die absoluten Verschiebungen, deutlich niedrigere relative Verschiebung im Bereich von $10\ \mu\text{m}$ in x- und y Richtung und ca. $30\ \mu\text{m}$ in z-Richtung.

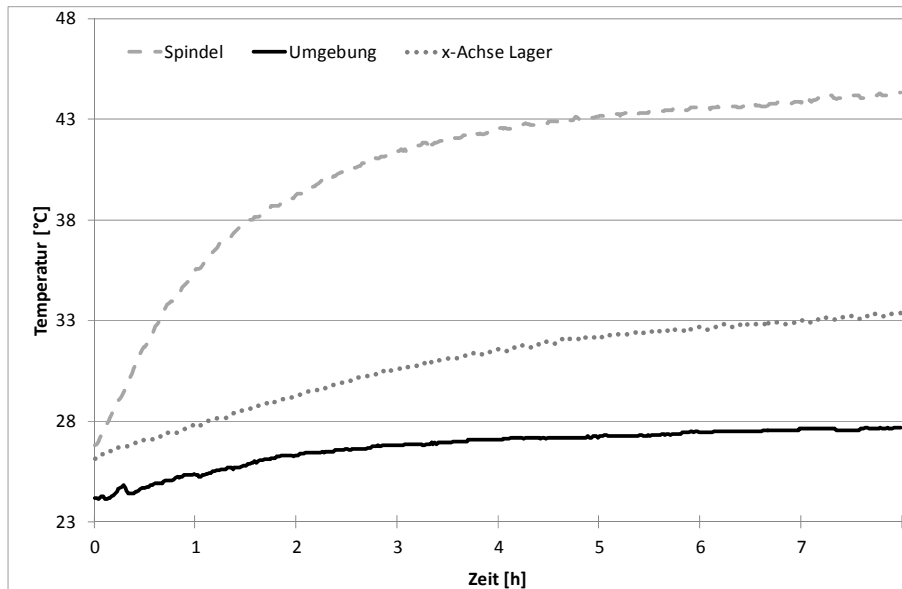


Abbildung 3: Temperaturverläufe an ausgewählten Komponenten

Da ein großer Anteil der Wärme durch den Zerspanprozess entsteht, soll dieser in weiteren Analysen ebenfalls berücksichtigt werden. Um das empfindliche Mess-equipment nicht unnötig zu belasten, wird der Zerspanprozess zunächst ausführlich aufgenommen und dann mit Hilfe einer Heizspirale nachgestellt. Dies ermöglicht den Einsatz derselben Messmittel und -strategie wie bei der Vernachlässigung des Zerspanprozesses.

4 Simulationsbasierte Methodik zur Analyse thermisch bedingter Verlagerungen

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Messungen zeigen, dass es durch den Wärmegang in Werkzeugmaschinen zu geometrischen Verschiebungen an der Wirkstelle des Werkzeuges kommt. Im Idealfall helfen die Ergebnisse dem Konstrukteur bereits im Entwicklungsprozess, diesem Effekt mit geeigneten Maßnahmen entgegenzuwirken. Aus diesem Grund bietet sich die Entwicklung einer simulationsbasierten Methodik an, welche allein auf Basis von CAD- und FE-Maschinenmodellen Rückschlüsse auf die Wärmeverteilung und die Verlagerungen von Maschinenkomponenten zulässt. Zur Realisierung des Vorhabens wird auf einen multidisziplinären Ansatz auf Grundlage der Methode der finiten Elemente unter Einbeziehung der numerischen Strömungssimulation zurückgegriffen. Die FEM

bietet sich durch die hohe Verbreitung von FE-Modellen in den Entwicklungsabteilungen an. Zur genaueren Abbildung der Wärmetübertragung zwischen umgebender Luft und Maschinenoberfläche wird parallel zum Strukturmodell ein CFD-Modell (Computational Fluid Dynamics) aufgebaut. Die Simulationsergebnisse dienen als Eingangsdaten für die Ermittlung der dreidimensionalen Temperaturverteilung in der Maschine (Abb. 1).

Im Sinne einer schrittweisen Bearbeitung und einer damit verbundenen Erfolgskontrolle des Vorhabens ist es sinnvoll, die Betrachtungen nach stationären und instationären Betriebszuständen zu unterteilen. Für den komplexen Fall der Untersuchung instationärer Betriebsvorgänge wird eine grobe Zeitdiskretisierung angestrebt, wobei eine Zerlegung in quasistationäre Zustände erfolgt. Dabei kann die thermische Verlagerung zu definierten Zeitpunkten simuliert werden. Durch Aneinanderreihen der Einzelergebnisse kann der zeitliche Verlauf des Wärmeganges und somit der instationäre Betriebsvorgang näherungsweise nachgebildet werden. Für einen durchgängigen Entwicklungsprozesses ist hierbei der Lösungsansatz, der für die strukturmechanischen Eigenschaften entwickelt wurde, zu berücksichtigen. Bereits vorhandene FE-Modelle sollten beispielsweise für die Bestimmung der thermisch bedingten TCP-Verlagerung genutzt werden können. Durch die Wiederverwendung wird der Aufwand der Modellbildung wesentlich reduziert.

4.1 Strömungssimulation als Ausgangsbasis für die Struktursimulation

Als Grundlage für die CFD-Simulation dient ein CAD-Modell der Maschine. Dieses wird zunächst in das CFD-Programm eingelesen und anschließend vereinfacht. Dabei werden Regionen, welche für die Strömungssimulation nicht relevant sind, entweder stark vereinfacht oder komplett entfernt. Außerdem werden in diesem Schritt virtuelle Lücken zwischen den einzelnen Bauteilen im Mikrometerbereich, welche für die Konstruktion irrelevant, für eine Strömungssimulation jedoch bedeutend sind, mittels in der CFD-Software implementierten Algorithmen geschlossen.

Es folgt die Generierung des Netzes (siehe Abb. 4) und die anschließende Vorbereitung der Simulation. Hierbei werden beispielsweise Wärme- und Strömungsquellen (freie und erzwungene Konvektion) innerhalb der Maschine definiert und beschrieben. Nach erfolgter Simulation werden die gewonnenen Oberflächentemperaturen der Maschine der FEM Simulation als Eingangsdaten bereitgestellt.

4.2 FEM-Simulation zur Ermittlung der Temperaturverteilung und Verlagerungen in der Maschine

Ziel des Aufbaus des FE-Modells ist die Simulation der dreidimensionalen Temperaturverteilung auf der Basis der experimentell gewonnenen Temperaturdaten unter Einbeziehung der thermischen Ausdehnung. Die genannten Daten dienen während der ersten Modellierungsphase als Eingangsparameter und werden bei der genaueren Modellierung durch die bei der CFD-Simulation gewonnenen Randbedingungen ersetzt. Die Zusammenführung der strukturmechanischen Modelle (mechanische und thermomechanische Eigenschaftsanalyse) soll die Wiederverwendbarkeit von Modelldaten und Analysewerkzeugen ermöglichen und damit entscheidend zur Aufwandsminimierung in den Entwicklungsabteilungen beitragen (modelltechnische

Einbindung in den Entwicklungsarbeitsplatz). Darauf aufbauend erfolgt die simulative Ermittlung der Relativverlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück auf der Basis thermischer Einflüsse.

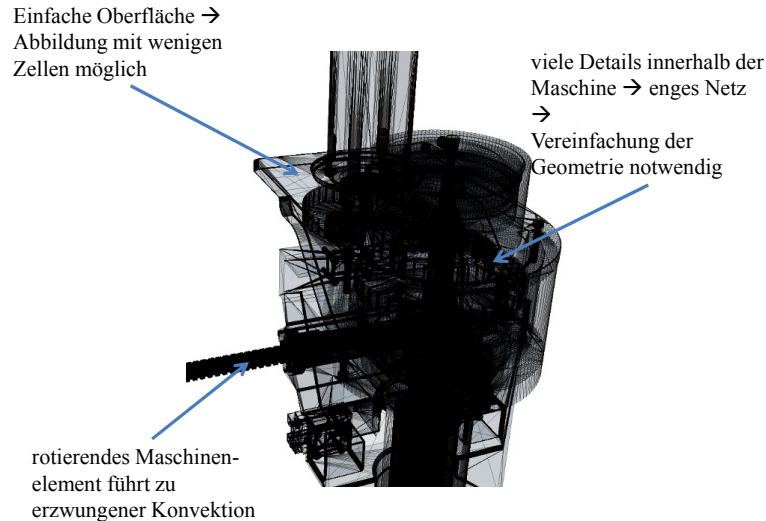


Abbildung 4: Vernetzte Hauptspindel der Fräsmaschine DMU 35-M als Vorbereitung zur CFD Simulation

4.3 Sinnvolle Kopplung der Strömungs- und Struktursimulation

Da es sich bisher als sehr zeitaufwendig erwiesen hat, parallel zwei Simulationsmodelle aufzubauen und diese anschließend durch die Übergabe von Daten aufwendig zu verbinden, wird im noch zu bearbeitenden Teil des Verbundprojektes auch die sinnvolle Kopplung dieser beiden Simulationen untersucht.

Hierzu müssen jedoch zunächst alle nötigen Daten ermittelt und mit den zur Verfügung stehenden abgeglichen werden. Anschließend erfolgt die Definition einer Schnittstelle, mit welcher der Aufwand für die Analyse thermisch bedingter Verlagerung, auch durch Wiederverwendungsmöglichkeiten der Modelle, minimiert werden soll.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das dargestellte Verfahren liefert eine simulationsgestützte Methode, mit welcher der Wärmegang von Werkzeugmaschinen infolge unterschiedlicher Betriebszustände und -vorgänge, bezogen auf den statischen, lagegeregelten Zustand ermittelt werden kann. Anhand der Simulationsergebnisse soll erörtert werden, wie zukünftig konstruktive Maßnahmen oder Kompensationsmaßnahmen effektiver umgesetzt werden können, um eine Genauigkeitssteigerung zu erreichen. Daher wird abschließend exemplarisch, mittels der identifizierten thermischen Wirkketten

sowie deren Korrelationen ein lineares Kompensationsverfahren erarbeitet werden. Parallel hierzu werden konstruktive Verbesserungen für die betrachteten Versuchstände vorgeschlagen. Neben der Bauweise soll hierbei auch auf Materialien und Sensorik eingegangen werden. Basis hierfür ist die Wiederverwendbarkeit von Modelldaten und Analysewerkzeugen zur Aufwandsminimierung. Nötig dafür ist die Zusammenführung der strukturmechanischen Modelle zur mechanischen und thermomechanischen Eigenschaftsanalyse. Diese Maßnahmen sollen die Leistungsfähigkeit und das Potenzial des umgesetzten Ansatzes verdeutlichen.

Literatur

- GLEICH, Sven: Simulation des thermischen Verhaltens spanender Werkzeugmaschinen in der Entwurfsphase. Chemnitz: Dissertation, TU Chemnitz, 2008.
- GROßMANN, Knut; JUNGNICHEL, Günther: Prozessgerechte Bewertung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Dresden: Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, 2006.
- GROßMANN, Knut; JUNGNICHEL, Günther: Thermische Modellierung von Prozesseinflüssen an spanenden Werkzeugmaschinen. Dresden: Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, 2008.
- ISO 230 Teil 3: Prüfregele für Werkzeugmaschinen - Teil 3: Prüfung des thermischen Verhaltens. August 2007.
- NEUGEBAUER, Reimund; ZWINGENBERGER, Carsten; KEHL, Gerhard: Verbesserung der Genauigkeit durch thermische Simulation. In: ATZproduktion, Wiesbade, 2(2009)03-04, S. 06-10.
- WECK, Manfred; BRECHER, Christian: Werkzeugmaschinen 5 – Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 7. Auflage 2006.