

# **Integrativer Einsatz von CAx-Tools auf Basis einer multidisziplinären Simulation am Beispiel eines Produktionssystems**

Dipl.-Phys. R. Guserle und Prof. Dr.-Ing. M. F. Zäh  
reinhard.guserle@iwb.tum.de  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, *iwb*  
Technische Universität München  
Anschrift: Boltzmannstraße 15, 85748 Garching

## **Kurzfassung**

Das dynamische und thermische Verhalten ist entscheidend für die erzielbare Genauigkeit von Werkzeugmaschinen. Sowohl eine belastungsgerechte Gestaltung der Strukturkomponenten als auch die thermischen Einflüsse der Bewegungsverläufe der translatorischen und rotatorischen Antriebssysteme einer Werkzeugmaschine gilt es frühzeitig im Entwicklungsprozess mechatronischer Systeme mit zu berücksichtigen. Im vorliegenden Beitrag wird ein Konzept auf Basis eines integrativen Einsatzes von CAx-Tools zur effizienten und schnellen Entwicklung von Werkzeugmaschinen vorgestellt. Anhand eines FEM-Ansatzes wird die Analyse der thermischen Einflüsse der Bewegungsabläufe in ein erweitertes Entwicklungsvorgehen integriert. Das implementierte Konzept ermöglicht eine Abschätzung der Verlagerung des Tool Center Point's (TCP) und damit der Genauigkeit von Werkzeugmaschinen aufgrund dynamischer und thermischer Effekte.

## **1 Einleitung**

Im Bestreben, den globalen Herausforderungen in der Produktionstechnik begegnen zu können, sind die Maschinenhersteller gefordert, stets innovativere Produkte als die Konkurrenz zu entwickeln. Schlagwörter wie schneller, genauer, dynamischer und leichter charakterisieren die Tendenzen der Produktionstechnik und beherrschen das Vokabular in Entwicklung und Vertrieb gleichermaßen. Vor dem Hintergrund kontinuierlich steigender Leistungsdichten, wachsender Genauigkeitsanforderungen und der Umsetzung größerer Energiemengen in kürzeren Zeiten, gewinnt zunehmend das instationäre thermische Verhalten, speziell bei Werkzeugmaschinen, an Bedeutung. Für die zielgerichtete Gestaltung von Maschine und Prozess gilt es deshalb, neben der Kinematik, Statik und Dynamik besonders das thermische Verhalten in aussagefähigen modellbasierten Analysen mit zu berücksichtigen und in den konstruktiven Entwicklungsprozess einzubetten [1].

## **2 Concurrent Engineering**

Im Bestreben, einheitliche Entwicklungsvorgehen für mechatronische Produktionssysteme zu etablieren, hat der VDI einige Richtlinien erarbeitet. In der VDI-Richtlinie

2221 werden beispielsweise allgemeingültige, branchenunabhängige Grundlagen für methodisches Entwickeln und Konstruieren beschrieben. Ergänzend hierzu wird in der VDI-Richtlinie 2206 - Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme - die domänenübergreifende Entwicklung mechatronischer Systeme methodisch unterstützt. Im erweiterten Sprachgebrauch der Konstruktionsmethodik bzw. des mechatronischen Entwicklungsprozesses findet sich häufig der Begriff Concurrent Engineering bzw. Simultaneous Engineering [2]. Diese Begriffe sind keinesfalls in einem konträren Zusammenhang zu einem einheitlichen Entwicklungsvorgehen zu verstehen, sondern dienen vielmehr der Präzisierung bzw. Beschreibung einzelner Abläufe. Erstmals wurde der Begriff Concurrent Engineering (CE) 1986 durch das American Institute for Defence Analysis (IDA) begleitend zur Einführung des Computer Integrated Manufacturing (CIM) geprägt.

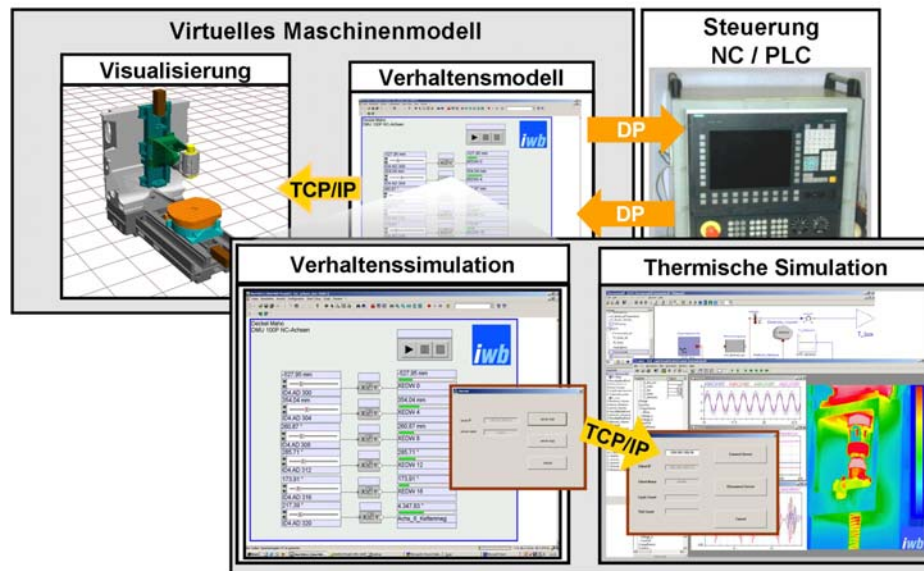
Gerade die Vernetzung der an der Entwicklung beteiligten Softwarewerkzeuge ermöglicht eine unterstützende Handhabung der VDI-Richtlinie 2206 im Sinne einer multidisziplinären Simulation. Anhand eines Entwicklungsbeispiels wird dies im Folgenden belegt. Ziel der im Rahmen dieses Beitrages vorgestellten Forschungstätigkeiten ist die Weiterentwicklung und Spezifikation von Methoden und Virtual-Prototyping-Techniken sowie von Optimierungsverfahren für den computerunterstützten Entwurf von Produktionsmaschinen.

### **3 Optimierungskonzept für das thermische Verhalten im Entwicklungsprozess von Werkzeugmaschinen**

Neben der Steigerung der Dynamik einer Werkzeugmaschine darf in der Konstruktionsphase die Thermosymmetrie nicht vergessen werden. Eine ausgewogene thermale Bilanz ist neben der Bewegungsdynamik entscheidend für die Genauigkeit der Maschine und beeinflusst damit den steuerungstechnischen Aufwand zur Implementierung entsprechender Kompensationsverfahren [3, 4]. Es wird daher zukünftig immer wichtiger, bereits frühzeitig in der Konzeptphase analog zur dynamischen Simulation das thermische Verhalten in aussagefähigen Modellanalysen abzubilden, um Nacharbeiten an den realen Prototypen zu minimieren [5, 6].

Ausgehend von einem 3D-CAD-Modell wird ein kinematisches Modell abgeleitet, das an das am *iwb* entwickelte Hardware-in-the-loop-System (HIL) [7, 8] angeschlossen wird. Nach einer VDI-Definition werden bei der HIL Teile eines Systems durch mathematische Modelle ersetzt, während elektronische oder mechanische Komponenten (z. B. ein Steuergerät) in einem geschlossenen Regelkreis mit dem Simulationsrechner verbunden werden. Dadurch kann das virtuelle Modell über eine reale Steuerung kontrolliert werden und jeden beliebigen Verfahrzyklus ausführen. Durch eine Erweiterung des HIL-Systems können die Positionen und auftretenden Momente an den jeweiligen Komponenten übergeben und mittels des Simulationsprogramms Dymola [9, 10] weiterverarbeitet werden (siehe Bild 1). Aus den Berechnungen der Verlustleistungen, beispielsweise der einzelnen Getriebe und Motoren, können über eine Implementierung der finiten Wärmeleitungsgleichung die Knotenpunkttemperaturen ermittelt werden [11]. Im Anschluss daran können über die berechneten Temperaturfelder durch Abbildung der Wärmeübertragungsmechanismen die Verzerrungen und die Deformationen der einzelnen Komponenten sowie die Verlagerung des Tool Center Point's berechnet werden. Dies ermöglicht frühe Er-

kenntnisse hinsichtlich der thermosymmetrischen Gestaltung einzelner Komponenten, der konstruktiven Anbringung von Sensoren bzw. Messsystemen sowie der Auswahl und des Tests von Kompensationsstrategien.



**Bild 1:** Konzept zur simulativen Ermittlung des Wärmeeintrages an Werkzeugmaschinen

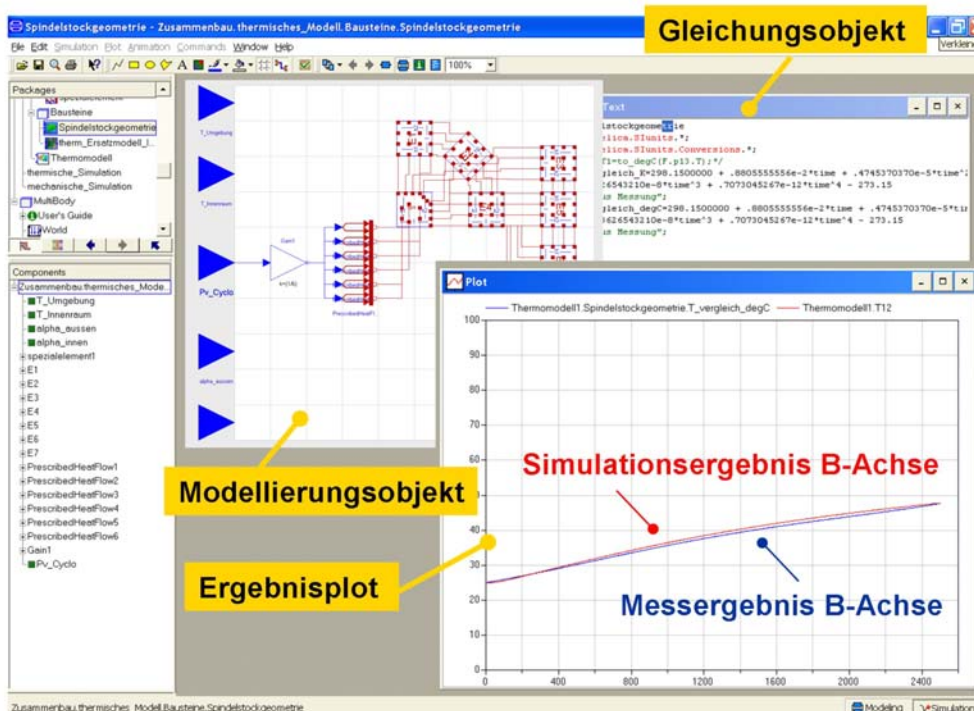
#### 4 Multidisziplinäre Simulation und Optimierung - Objekt-orientierte Modellierung und Simulation

In messtechnischen Untersuchungen des mechatronischen Systems konnte als Hauptwärmequelle bei der zugrunde liegenden Maschine die Schwenkachse lokalisiert werden. Während der Schwenkbewegung dieser so genannten B-Achse ergibt sich eine Abhängigkeit der Verlustleistung vom Belastungsdrehmoment sowie der Drehzahl der eingebauten Getriebe-Servomotor-Baugruppe. Der Bewegungsablauf erfolgte in Anlehnung an die ISO-230-3 [12] mit einer Geschwindigkeit von bis zu 10800 rad/min. Für die Ermittlung der Verlustleistungen sind aus den Datenblättern die Wirkungsgradkennlinien abzuleiten und gegebenenfalls anzunähern. Um diese Abhängigkeit in der Simulationsumgebung zu hinterlegen, wurden die Graphen durch ein Polynom fünften Grades approximiert.

Basierend auf diesem Ansatz ist es möglich, die Verlustleistungen der Getriebe-Servomotor-Baugruppe für jeden beliebigen Lastfall und Drehzahlbereich zu jedem Zeitpunkt zu berechnen. Durch die entwickelte Dymola-Schnittstelle ist die Anbindung an das bereits erwähnte HIL-System möglich. Die Übergabe der Positionswerte, Drehzahlen und Drehmomentwerte erfolgt somit in Echtzeit und ist nur durch die limitierte Datenverwaltung in Dymola begrenzt.

Das Bild 2 zeigt einen Teilausschnitt des aus mehreren Simulationsbausteinen bestehenden Modells sowie den Temperaturverlauf für einen simulativ ermittelten und

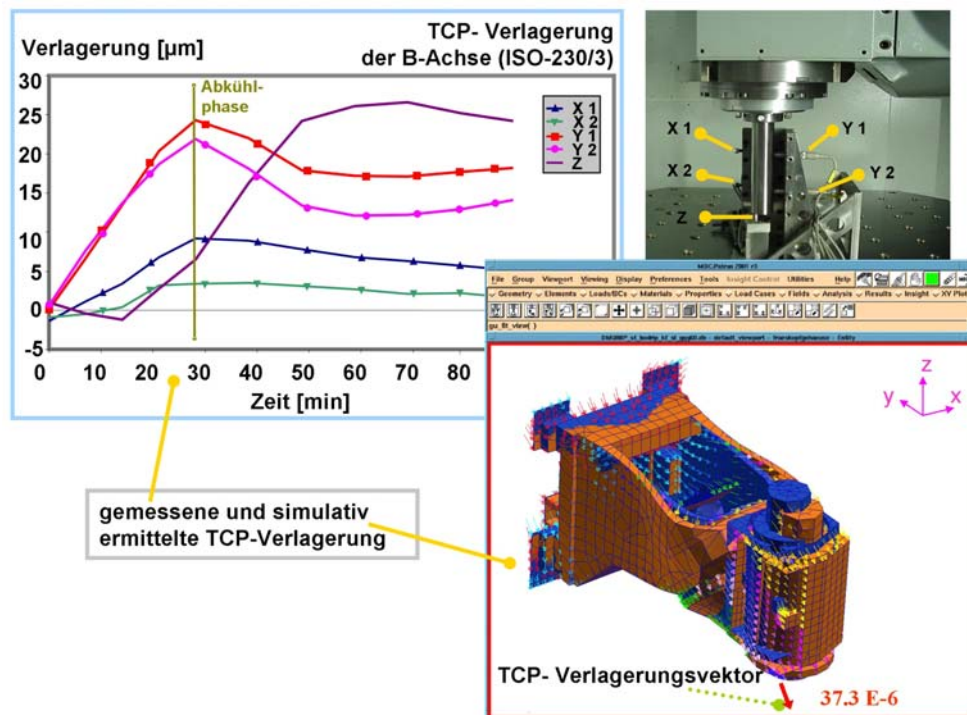
für einen gemessenen Knotenpunkt der Schwenkkopfseinheit. Deutlich erkennbar ist die sehr genaue Bestimmung des Temperaturverlaufs für den gewählten Verfahrzyklus.



**Bild 2:** Objektorientierte Modellierung des thermischen Verhaltens in Dymola

Nach der Berechnung der 4x4 Knotenpunkte pro modelliertes Element können die Temperaturwerte an ein FEM-Berechnungsprogramm übergeben werden. Dabei kann auf das Modell aus der Berechnung des Eigenschwingungsverhaltens zurückgegriffen werden. Es werden nun zusätzlich zu den mechanischen Lastfällen die thermischen Randbedingungen berücksichtigt und die Abweichung des TCP's vom Sollwert berechnet (siehe Bild 3). Aus der Deformationsanalyse können dabei die strukturellen Eigenschaften und Konstruktionsmaßnahmen abgeleitet werden.

Zusätzlich können dynamische Untersuchungen mit thermischen Lastfällen kombiniert durchgeführt werden. Die Simulationsumgebung ist nun über die Anbindung an das HIL-System so weit spezifiziert, dass selbst die Entwicklung der Steuerungssoftware für Werkzeugmaschinen durchgeführt werden kann. Aus der Optimierung der Teilsysteme ist es den unterschiedlichen Abteilungen nun sowohl sichtenorientiert als auch disziplinübergreifend möglich, komplexe mechatronische Systeme bereits in der Konstruktionsphase zu analysieren und zu optimieren.



**Bild 3:** Simulierte und gemessene strukturelle Abweichung des Tool Center Point

## 5 Zusammenfassung

Charakteristisch für mechatronische Systeme sind die starken Wechselwirkungen mechanischer, elektrischer und informationstechnischer Komponenten. Die Entwicklung derartiger Systeme erfordert ein hohes Maß an interdisziplinärer Kompetenz und eine optimale Abstimmung der einzelnen Arbeitsschritte. Um den Entwicklungsprozess für Werkzeugmaschinen zu unterstützen, muss eine parallelisierte und vernetzte Entwicklung im Sinne von Concurrent Engineering angestrebt werden. In den unterschiedlichen Optimierungsschritten sind hierbei untereinander vernetzte leistungsfähige Entwicklungswerkzeuge einzusetzen. Komplexere Funktionen in kürzerer Zeit zu entwickeln stellt eine Herausforderung dar, die nur mit dem Einsatz fortschrittlicher Methoden und rechnergestützter Werkzeuge bewältigt werden kann.

Im vorliegenden Beitrag wurde hierzu eine neu entwickelte Simulationsumgebung vorgestellt, die die Simulation des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen ermöglicht. Anhand realer Verfahrensbewegungen der NC-Achsen wird die Verlustleistung berechnet und daraus das instationäre Temperaturverhalten abgeleitet. Der Einsatz des beschriebenen Formalismus auf der Basis eines objektorientierten modellbasierten Ansatzes [13] ermöglicht somit eine sehr spezifische Erfassung des Wärmeintrages an den einzelnen Komponenten eines komplexen Systems. Die Bestimmung

der Temperaturverteilungen und Verformungen kann somit in enger Abstimmung mit der Maschinenentwicklung bzw. mit Messuntersuchungen am Prototyp durchgeführt werden. Im Rahmen weiterer Forschungstätigkeiten wird untersucht, inwieweit die entwickelte Vorgehensweise für sämtliche Vorschubachsen und für die Maschine während der Bearbeitung effizient in das Entwicklungs-vorgehen mit eingebunden werden kann.

## 6 Literatur

- [1] *Zäh, M. F.; Guserle, R.; et al.*: Die Virtuelle Werkzeugmaschine als integrierter Entwicklungsarbeitsplatz. In: *iwb Seminarberichte* 66, 2003, Herbert Utz-Verlag.
- [2] *Brazier, D.; Leonard, M.*: "Concurrent Engineering: Participating in Better Designs", *Mechanical Engineering*, Vol. 112, January 1990, S. 52-53.
- [3] *Bonse, R.*: Thermisches Last-Verformungsverhalten von Werkzeugmaschinen. Diss. RWTH Aachen, Shaker-Verlag, 1999.
- [4] *Stehle, T.*: Berechnung thermischer Verformungen und Verlagerungen an Werkzeugmaschinen und Möglichkeiten zur Kompensation. Diss. Universität Stuttgart, 1997.
- [5] *Zäh, M. F.; Guserle, R.*: Ermittlung des Wärmeeintrages an Werkzeugmaschinen. In: *iwb newsletter*, Jahrgang 13, Nr. 1, 2005; S. 5-7.
- [6] *Großmann, K.; Jungnickel, G.*: Instationäres thermoelastisches Verhalten von Vorschubachsen mit bewegtem Wälzkontakt, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, TU Dresden, 2003.
- [7] *Zäh, M. F.; Wunsch, G.; Pörnbacher, C.; Ehrenstrasser, M.*: Emerging Virtual Machine Tools. In: *ASME DETC2003/DAC-48756*, 2003.
- [8] *Zaeh, M. F.; Wunsch, G.; Pörnbacher, C.; Munzert, U.*: Offline Cycle Time Reduction Using Hybrid Virtual Assembly Plants - A Mechatronic Approach. In: *CIRP Design Seminare*, 2004.
- [9] *Otter, M.*: Objektorientierte Modellierung mechatronischer Systeme am Beispiel geregelter Roboter. Diss. Ruhr-Universität Bochum, 1994.
- [10] *Otter, M.; Elmqvist, H.; Mattsson, S. E.*: The New Modelica MultiBody Library. In *Proceedings of the 3rd International Modelica Conference* (P. Fritzson, ed.), (Linköping), The Modelica Association and Linköping University, November 2003.
- [11] *Guserle, R.; Zäh, M. F.*: Application of Multidisciplinary Simulation and Optimization of Mechatronic Systems in the Design Process; In *IEEE/ASME: Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2005)*, 24.-28. July, 2005, Monterey, Ca., USA.
- [12] *Frank, A.; Ruech, F.*: Position measurement in CNC machines: rotatory encoder versus linear transducer, how to cope with the thermal problems. In: *Proceedings of LAMCAMP*, Newcastle, UK, 1999, S. 369-378.
- [13] *Fritzson, P.*: Principles of Object-Oriented Modeling and Simulation. In: *IEEE Press, Piscataway*, 2004.