



Doctoral Thesis

## Simulation and compensation of thermal errors of machine tools

**Author(s):**

Ess, Markus

**Publication Date:**

2012

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-7357121> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 20300

# Simulation and Compensation of Thermal Errors of Machine Tools

A dissertation submitted to the  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
MARKUS ESS  
MSc. ETH Zurich  
born March 14th 1984  
citizen of Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. K. Wegener, examiner  
Prof. Dr. O. Zirn, co-examiner

2012

---

# Abstract

The following thesis deals with the simulation and compensation of thermal errors on machine tools using the finite element method (FEM). Whilst FEM has become increasingly important in analyzing the static behavior, its usage for thermal problems has so far been limited. This is because the thermal error on machine tools depends on a wide variety of effects, leading to a complexity that is hard to comprehend in its entirety.

The first problem is that machine tools consist of a large variety of components that influence the thermal behavior and as such it is necessary to understand the physics of every component. A variety of models are created for these components. These models are founded on known parameters and render further measurements for parameter identification unnecessary. This is of utmost importance during the design phase, where no prototype exists that can be used for measuring. Still it is desirable to perform reliable simulations in order to determine the quality of the design.

Common components are rolling bodies that are used in bearing, guideways and ball screws. Appropriate models are shown that consider the load and velocity of the rolling bodies in order to determine their friction loss and heat conductance. Feed drives and auxiliary components can also be found on every machine tool and hence models are derived that can be used to study their effect.

Even if the physics for these components are known it still is a difficult task to implement these in a FEM software. Some tasks that are connected to this are the implementation of the equations for the models in the FEM software, the knowledge of the loads and velocities and how to consider the positioning of the axes. A simulation software, called Virtual Machine Prototype (VMP) was developed in order to remedy the aforementioned problems. It is specifically design to simulate machine tools and to assist designers in creating more accurate and better machine tools. VMP consists of a multibody dynamics and thermomechanical FE code. Multibody dynamics are included to derive the loads on the components based on the NC path. The thermomechanical FE code automatically updates the model of the machine tool according to its current state and position.

The next step is to ensure that the simulation of the thermal problem can be performed in a matter of minutes. This is contrary to the common knowledge that the simulation of thermal problems can take many hours and even days. Whilst many researchers try to reduce the thermal system of equations, it will be shown that this is not necessary. By analyzing the physics behind thermal problems it is possible to write the problem in such a way that the solution takes little time.

Together with a reduction of the mechanical system of equations it is even possible to use FEM for the compensation of thermal errors on a machine tool. VMP will be connected to the CNC of a machine tool in order to compensate the thermal error in the whole working

envelope of the machine tool. VMP uses the NC path to compute the state of the machine tool and then sends a command back to the CNC to move the axes in such a way that no relative error between the TCP and WCP occurs.

A lot of measurements have also been conducted in order to give a better understanding of the effects that have to be considered. These effects are made up from various internal and external heat sources, but also the design of the machine tool plays an important role.

The models that have been derived were verified with a variety of simulations. The results of the simulation have been compared with the measurements that were conducted. The compensation was also implemented on a machine tool and it was shown that the thermal error could be kept within  $5\mu m$ .

---

# Kurzfassung

Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation und Kompensation von thermischen Fehlern an Werkzeugmaschinen mit der Finite Element Methode (FEM). Obwohl FEM im Bereich der Simulation des statischen Verhaltens bereits eine weite Verbreitung erzielt hat, wird sie selten für thermische Probleme verwendet. Einer der Gründe hierfür besteht sicher darin, dass das thermische Verhalten von einer Vielzahl an Effekten beeinflusst wird, was zu einer hohen Komplexität führt. Dies erschwert es, alle Effekte vollständig zu erfassen und nachzubilden.

Eines der Probleme ist, dass Werkzeugmaschinen aus einer Vielzahl an Komponenten bestehen, die das thermische Verhalten beeinflussen. Deshalb ist es notwendig die physikalischen Zusammenhänge von jeder dieser Komponenten zu verstehen. Eine Vielzahl von Modellen wurde für diese Komponenten erstellt. Diese Modelle basieren auf bekannten Parametern, so dass zusätzliche Messungen für die Parameteridentifikation unnötig werden. Dies spielt insbesondere in der Entwicklungsphase eine Rolle, in der noch kein Prototype für Messungen zur Verfügung steht. Trotzdem ist es von Vorteil, wenn bereits zuverlässige Simulationen durchgeführt werden können, um das zukünftige Maschinenverhalten zu bestimmen.

Eine der häufigsten Komponente sind Wälzkörper, die in Führungen, Lagern und Kugelgewindetrieben verwendet werden. Geeignet Modelle wurden entwickelt, die die Last- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der Wälzkörper berücksichtigen, um ihre Wärmeleitfähigkeit und Reibungsverluste zu bestimmen. Vorschubantriebe und Nebenaggregate sind weitere Elemente, die an jeder Werkzeugmaschine gefunden werden können. Folglich werden auch Modelle für diese Komponenten vorgestellt.

Selbst wenn die physikalischen Zusammenhänge dieser Komponenten bekannt sind, ist es immer noch ein grosser Aufwand, diese in ein FEM-Programm einzubinden. Einige Punkte, die hiermit in Verbindung stehen, sind die Einbindung der Modelle in das FEM-Programm, die Kenntnis der Lasten und Geschwindigkeiten und die Berücksichtigung der Achsposition. Eine Simulationssoftware namens Virtual Machine Prototype (VMP) wurde entwickelt um die genannten Probleme zu beseitigen. Sie wurde speziell dafür entwickelt, um Werkzeugmaschinen zu simulieren und Konstrukteuren dabei zu helfen genauere und bessere Maschinen zu entwickeln. VMP besteht aus einem Starrkörper- und einem thermomechanischem FEM-Code. Mittels des Starrkörperverhaltens lassen sich die Lasten auf die Komponenten aufgrund der NC-Bahn berechnen. Der thermomechanische FEM-Code aktualisiert automatisch das Modell der Maschine in Abhängigkeit des aktuellen Zustands der Maschine und der Position der Achsen.

Der nächste Schritt ist es sicherzustellen, dass die Simulation der thermischen Probleme in wenigen Minuten durchgeführt werden kann. Dies ist im Widerspruch zur weitverbreiteten Meinung, dass die Simulation von thermischen Problemen mehrere Stunden, bis zu wenigen Tagen dauern kann. Während die Forschung ihr Augenmerk häufig auf Re-

duktionsmethoden richtet, wird hier gezeigt, dass diese für das thermische Problem nicht notwendig sind. Die Formulierung des thermischen Problems wird so gemacht, dass die Lösung nur einen geringen numerischen Aufwand hat.

Wird zusätzlich noch eine Reduktion des Gleichungssystems für das mechanische Verhalten vorgenommen, ist es möglich FEM zur Kompensation des thermischen Fehlers auf Werkzeugmaschinen zu verwenden. VMP kann hierbei mit der CNC einer Werkzeugmaschine verbunden werden, um den thermischen Fehler im ganzen Arbeitsraum zu kompensieren. VMP benutzt hierfür die NC-Bahn um den aktuellen Zustand der Maschine zu berechnen und schickt dann ein Signal zurück an die CNC. Dieses Signal bewegt die Achsen so, dass kein relativer Fehler zwischen dem Werkzeug und Werkstück entsteht.

Eine Vielzahl von Messungen wurde durchgeführt, um ein besseres Verständnis für thermisch bedingte Fehler zu schaffen. Die Messungen geben eine Übersicht über eine Vielzahl von Effekten die zu den thermischen Fehlern führen. Diese Effekte hängen nicht nur von einer Reihe internen und externer Wärmequellen ab, sondern auch vom Aufbau der Maschine.

Die Modelle, die hergeleitet wurden, werden anhand einer Vielzahl von Simulationen verifiziert. Die Ergebnisse der Simulationen werden dann mit den Messungen verglichen. Die Kompensationsmethode wurde auf einer Werkzeugmaschine implementiert und die resultierenden thermischen Fehler waren kleiner als  $5\mu m$ .