

Virtuelle Klimatisierung von Werkzeugmaschinen

Echtzeit-Kompensation thermischer Fehler von Maschinen mittels OPC UA

Mark P. Sanders, Maithili Deshmukh, Matthias Bodenbenner, Dominik Wolfschläger, Robert H. Schmitt

ZUSAMMENFASSUNG Harte Echtzeitanforderungen bei der Pfadinterpolation in Werkzeugmaschinen stellen Systeme zur Fehlerkompensation vor Herausforderungen: Positionsabhängige Korrekturwerte müssen zuverlässig alle 2 ms verfügbar sein. Detaillierte Temperaturmodelle sind hierfür zu rechenintensiv. Die Autoren konzeptionieren, entwickeln, und testen daher ein kennfeldbasiertes System zur Korrektur thermischer und statischer Fehler. Dieses kodiert das Fehlerverhalten in Geometriefehlertabellen, die regelmäßig per OPC UA aktualisiert werden. So werden die Echtzeitanforderungen der Modelle signifikant reduziert.

STICHWÖRTER

Industrie 4.0, Fertigungsmesstechnik, Produktionstechnik

Virtual Climatization for Machine Tools – Real-Time Thermal Error Compensation in Machine Tools via OPC UA

ABSTRACT Strict real-time requirements in path interpolation for machine tools pose challenges for error compensation systems: Position-dependent correction values must be reliably available every 2 ms. Detailed temperature models are too computationally intensive for this purpose. Therefore, the authors conceptualize, develop, and test a look-up table-based system for correcting thermal and static errors. This system encodes the error behavior in geometry error tables, which are regularly updated via OPC UA. As a result, the cycle-time requirements are significantly reduced.

1 Einleitung und Motivation

In moderner spanender Fertigung bleiben enge Toleranzen bei großen Werkstücken aufgrund der Komplexität und Individualität der Produkte eine erhebliche Herausforderung [3, 4]. Mit zunehmender Nachfrage nach Präzision – insbesondere in Branchen wie Luft- und Raumfahrt, Automobil und Energie – müssen Hersteller sicherstellen, dass große Bauteile strenge Qualitätsstandards erfüllen. Die benötigte Genauigkeit solcher Komponenten zu erreichen, gestaltet sich aufgrund verschiedener Faktoren als schwierig, dazu zählen geometrische Fehler sowie Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen. Thermische Fehler stellen eine wesentliche Quelle von Ungenauigkeiten bei Werkzeugmaschinen dar, insbesondere bei Großmaschinen, bei denen Temperaturschwankungen zu erheblichen strukturellen Deformationen führen können [5]. Daher ist die Entwicklung von Lösungen zur Reduzierung thermischer Fehler notwendig, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Maschinen zu verbessern [6]. Konventionelle Methoden zur Aufrechterhaltung der Präzision basieren auf energieintensiver Klimasteuerung und Kühlmaßnahmen, die thermische Störungen unterdrücken [7].

Gleichzeitig machen zwei existenzielle Faktoren deutlich, dass es nicht nur darum geht, eine Steigerung des Energieverbrauchs zu vermeiden, sondern ihn so weit wie möglich zu reduzieren. Erstens haben die COVID-19-Pandemie [8] und der Krieg in der

Ukraine gezeigt, wie drastisch die Energiepreise schwanken können [9] – was direkte Auswirkungen auf die Unternehmensprofitabilität hat. Zweitens wurde aus klimatischer Sicht das 1.5 °C-Ziel kürzlich überschritten [10, 11].

Vor diesem Hintergrund erkennen Unternehmen zunehmend, dass eine Steigerung der Energieeffizienz entscheidend ist – sowohl zur Kosteneinsparung als auch zur Erfüllung von ESG-Zielen [12]. Infolge dieser Entwicklung rückte die Energieeffizienz noch stärker in den Fokus, was sich unter anderem in aktuellen Normen (beispielsweise ISO 14955-1:2017), Studien [13] und weiteren Entwicklungen [14] widerspiegelt.

Dieser Wandel hat die Forschung an dem innovativen Ansatz Virtuelle Klimatisierung angeregt, der in **Bild 1** grafisch zusammengefasst ist. Das Kernkonzept besteht darin, modellbasierte Methoden zur Vorhersage thermisch induzierter Fehler einzusetzen, um steuerungs-basierte Fehlerkompensationsverfahren für Bearbeitungsprozesse zu ermöglichen [1].

Dieser Beitrag fokussiert in diesem Kontext die mathematische Modellierung der Fusion komplementärer Modelle zur Kompensation thermischer Einflüsse sowie die Einspeisung der resultierenden Korrekturen in Echtzeit via OPC UA. Dieser Schwerpunkt ist in **Bild 1** grün hervorgehoben. Der Rest des Beitrags ist wie folgt gegliedert: Zunächst folgt der Stand der Technik zur Fehlerkompensation von Werkzeugmaschinen. Im dritten Abschnitt wird die mathematische Modellierung zur Kompensation thermi-

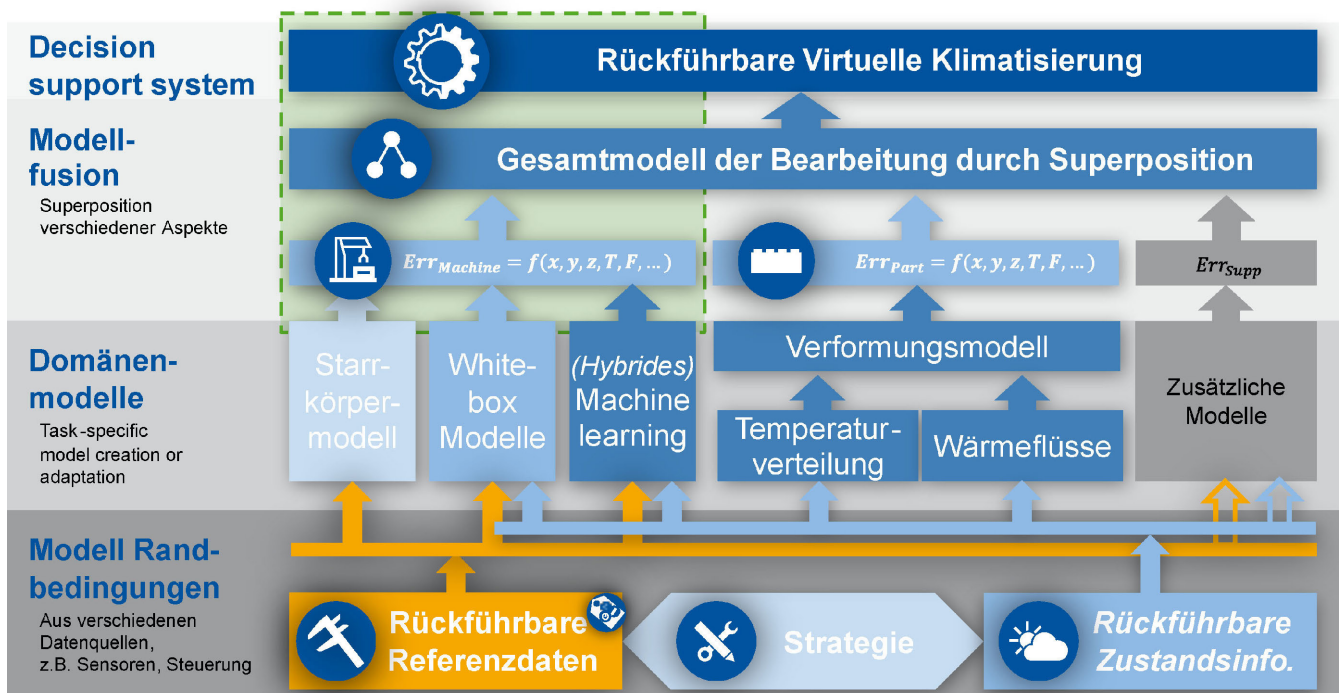


Bild 1 Das Konzept Virtuelle Klimatisierung [1, 2] fasst verschiedene Aspekte der (thermischen) Fehler-Korrektur von Bearbeitungs- und Fertigungsprozessen zusammen. Der grün hinterlegte Bereich zeigt die in diesem Beitrag betrachteten Komponenten. Grafik: WZL-IQS | RWTH Aachen

scher Einflüsse hergeleitet, gefolgt von der simulativen Validierung des Ansatzes. Anschließend wird erläutert, wie die erhaltenen Fehlerterme mittels OPC UA in Echtzeit in die Maschine zurückgespielt werden, damit die Kompensation im Prozess angewendet werden kann.

2 Fehlerkompensation von Werkzeugmaschinen

Geometriefehler von Werkzeugmaschinen werden entsprechend ihrer zeitlichen Einflusskaskaden in statische, transiente (vor allem thermische) und dynamische Fehler kategorisiert. Virtuelle Klimatisierung adressiert statische und transiente Fehler. Die Korrektur statischer Fehler durch statische Kalibrierung und Kompensation ist industriell angewandter Stand der Technik. Die Stabilisierung präziser Bearbeitungsprozesse erfordert es aber auch den größten Einflussfaktor – die Temperatur – zu stabilisieren [5]. Der aktuelle Stand der Technik hierfür beruht darauf, präventiv auf alle relevanten Einflussfaktoren einzuwirken. Die aktive Regelung erfolgt beispielsweise in Form von aktiver physischer Kühlung mittels Kühlmittelstoffen oder klimaregelten Werkshallen [15]. Gleichzeitig können desensibilisierende Maßnahmen ergriffen werden, um thermische Effekte zu reduzieren – beispielsweise durch den Einsatz von Komponenten mit niedrigem thermischen Ausdehnungskoeffizient (CTE), thermosymmetrischem Design und einer Erhöhung der thermischen Trägheit [16].

Als energieeffiziente Alternative zu herkömmlichen, physischen Maßnahmen zur Reduktion thermischer Effekte wird am WZL der RWTH Aachen das Konzept der Virtuellen Klimatisierung für Werkzeugmaschinen erforscht. Dieses Konzept nutzt verschiedene Modelle, um thermisch bedingte und damit transiente Fehler vorherzusagen. Indem sich Virtuelle Klimatisierung

auf die Auswirkungen thermischer Einflüsse – und nicht auf deren Ursachen – fokussiert, soll eine Stabilisierung der Prozessergebnisse erreicht werden, ohne eine aufwendige Klimaregelung der gesamten Produktionsumgebung vorzuhalten. Somit zielt Virtuelle Klimatisierung darauf ab, den Energieverbrauch für Kühlmaßnahmen zu senken und gleichzeitig eine hohe Genauigkeit in den Produktionsprozessen zu gewährleisten [1, 2, 17].

2.1 Starrkörpermodellierung von Werkzeugmaschinen

Historisch entwickelte sich die Fehlerkompensation von Werkzeugmaschinen parallel zu Korrekturverfahren für Koordinatenmessgeräte [18]. Vor der Einführung von CNC-Maschinen war Maschinengenauigkeit ausschließlich durch mechanische Präzision und handwerkliches Geschick zu erzielen [19]. Die volumetrische Fehlerkompensation wurde in den 1970er-Jahren eingeführt [18]. Mit dem Aufkommen von CNC-Maschinen in den 1980er-Jahren wurden mathematisch modellbasierte Fehlerkorrekturen zu einer praktikablen Option [20].

In der heutigen industriellen Praxis werden die statischen Werkzeugmaschinenfehler mithilfe eines Rigid Body Models (RBM) oder eng verwandter Ansätze kompensiert [21]. Das RBM beschreibt eine Maschine als Reihe idealer, starrer Körper, die in einer kinematischen Kette miteinander verbunden sind. Jeder Körper weist bis zu sechs geometrische Fehlbewegungen auf (lineare Positionierung, zwei Geradheitsfehler und drei Winkelabweichungen) sowie mögliche Lage- und Orientierungsversätze. Durch Summation dieser Fehler entlang der kinematischen Kette – vom Werkstückspannmittel bis zur Werkzeugspitze – berechnet das RBM die gesamte volumetrische Abweichung im Werkzeugmittelpunkt (TCP) [22]. Dafür werden die Geometriefehlerinformationen in der Steuerung der Werkzeugmaschine als Look-up-Tabelle hinterlegt.

Tabelle. Vergleich verschiedener Methoden zur Kompensation thermischer Einflüsse auf Werkzeugmaschinen.

Methode	Vorteile	Nachteile	Echtzeitfähigkeit
Offline-Korrektur des NC-Programms	Universell einsetzbar	Häufige Neuberechnung notwendig Methode Code schwer lesbar	nein
Ausführung des Modells innerhalb der Steuerung [29]	Hohe Frequenz	Spezielle CNC-Plattform notwendig Begrenzte Rechenkapazität	<i>Nein</i> für komplexe Modelle aufgrund geringer Rechenleistung
externe Regelungsverfahren [28, 30]	Flexibel Unabhängig vom NC-Code	Externe Hard- und Software notwendig	Ja (abhängig von Hard- und Software)
Lookup-Tabellen [31, 32]	Offline-Berechnung der Korrektur	Unvollständige Abdeckung der thermischen Fehler [23, 33]	Ja

ISO 230-1:2012 ist ein in der Industrie etablierte Norm zur Darstellung geometrischer Fehler von Werkzeugmaschinen. Diese legt die Grundlage für die Prüfung der geometrischen Genauigkeit und die Beschreibung geometrischer Abweichungen fest. In Verbindung mit ISO 841:2001, die die Nomenklatur von Werkzeugmaschinen definiert, ermöglichen diese Normen eine einheitliche und allgemein verständliche Repräsentation von Werkzeugmaschinen und deren geometrischen Fehlern.

Obwohl damit vor allem quasi-statische Effekte erfasst werden, bilden diese einfachen Modelle nach wie vor das Rückgrat industriell etablierter Kompensationssysteme (zum Beispiel Siemens „Volumetric Compensation“ System VCS [23], Heidenhain „KinematicsComp“ [24] und Fanuc „3D Error Compensation“ [25]). Einige der Implementierungen lassen sich durch einfache thermische Längskorrekturen oder eindimensionale Interpolation zwischen stationären Fehlertabellen in Abhängigkeit von der Temperatur ergänzen [23]. Sie bilden damit aber nur rudimentär das komplexe temperaturbedingte Verhalten der Werkzeugmaschine ab. Durch die Integration in der Maschinensteuerung sind sie uneingeschränkt echtzeitfähig.

2.2 Stand der Technik zur Echtzeitfähigen Kompensation transienter thermischer Fehler

Bereits verfügbare, echtzeitfähige Teilmodelle für thermische Kompensation beschränken sich meist auf einzelne Baugruppen (insbesondere die Frässpindel) [26]. Solche lokalen Modelle sind leichter in Echtzeit umzusetzen, da sie weniger Variablen berücksichtigen und so innerhalb des Interpolationszyklus (IPO-Zyklus) berechnet werden können, lassen jedoch wesentliche Bestandteile thermischer Einflüsse unberücksichtigt. Alternativ können ganzheitliche Modelle eingesetzt werden, welche die gesamte Maschinenstruktur abbilden und dadurch ein vollständigeres Bild der thermischen Fehler liefern [27]. Diese ganzheitlichen Modelle sind jedoch aufgrund ihrer höheren Dimensionalität und Rechenkomplexität nur bedingt Echtzeitfähig. Echtzeitfähigkeit erfordert hier sowohl eine effiziente Berechnung als auch eine geeignete Einbindung in die Steuerung, damit pro IPO-Zyklus aktualisierte Korrekturwerte bereitstehen.

In der Praxis haben sich vier grundsätzliche Wege zur Fehlerkompensation etabliert [28], vgl. **Tabelle**. Da keine dieser Metho-

den eine ausreichende Kompensation der thermischen Einflüsse in Echtzeit ermöglicht, wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt, der Lookup-Tabellen-Verfahren mit dem Prinzip externer Regelung verbindet. Das Kernkonzept ist es, die thermisch bedingten Fehler als Geometriefehler zu modellieren und so in der Werkzeugmaschine zu hinterlegen. Die auf einem Starrkörpermodell basierenden Fehlertabellen werden in größeren Zeitabständen in der Maschine aktualisiert und bilden damit die transienten Fehler ab. Unter der Annahme, dass sich lediglich die Achspositionen im IPO-Zyklus ändern, während sich der thermische Zustand nur im Bereich einiger Minuten relevant ändert, lassen sich so zu jedem Zeitpunkt aktuelle thermische und statische Fehler in Fehlertabellen abbilden. Die Fehler lassen sich so in Echtzeit kompensieren, ohne dass die Modellberechnungen insbesondere der thermischen Modelle selbst im harten Echtzeittakt erfolgen.

3 Kontinuierliche, konsolidierte Bereitstellung von Fehlermodelldaten

Allgemeines Ziel einer transienten Fehlerkompensation ist es, aktuelle (Maschinen-)Informationen in Fehlerinformationen zu überführen, die mit der Steuerung der Werkzeugmaschine kompensiert werden können. Bei thermischen Fehlermodellen der Maschinenstruktur umfassen die Eingangsgrößen insbesondere Positions- sowie Temperatur- beziehungsweise Wärmestromdaten. Eine der wesentlichen Herausforderungen bei der Umsetzung transienter (thermischer) Fehlerkompensationsmodelle in Produktionsumgebungen besteht darin, deren Echtzeitfähigkeit sicherzustellen [5, 28]. Für eine Echtzeit-Kompensation muss die Steuerung die Korrekturwerte mit hoher Frequenz verarbeiten und anwenden; in der Regel erfolgt dies synchron zum IPO-Zyklus der Maschine, der bei Werkzeugmaschinen üblicherweise zwischen 250 Hz und 1 000 Hz liegt.

3.1 Umwandlung thermischer Fehlerinformationen in geometrische Fehler

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird ein Konzept zur Bereitstellung statischer und transienter Fehler in der Werkzeugmaschine beschrieben. Das Verfahren ist Lookup-Tabellen-basiert und bedient sich den Geometriefehlertabellen um dort sowohl

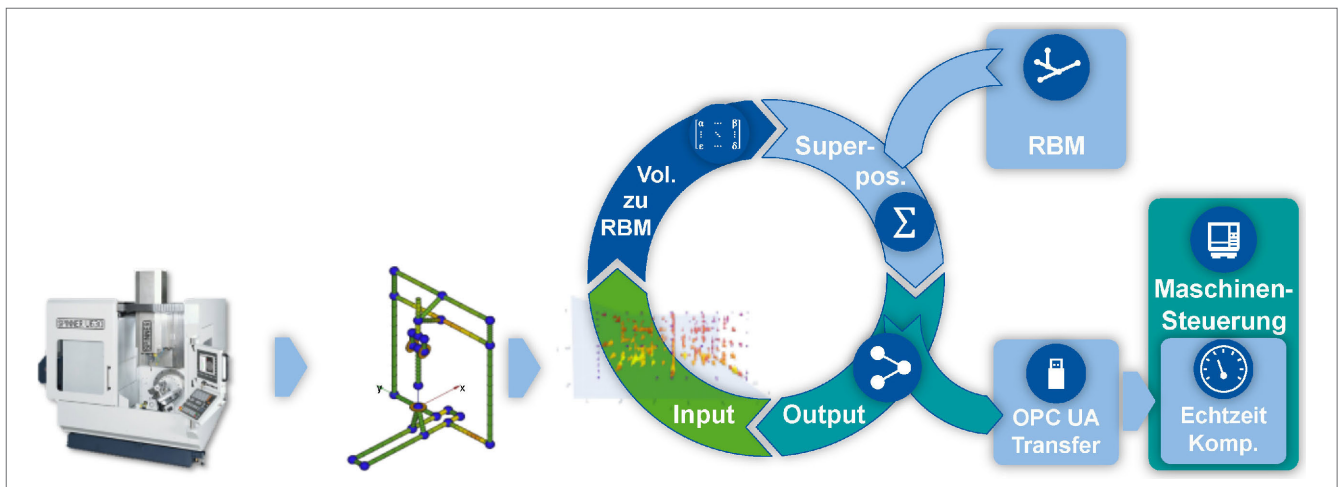


Bild 2 Das Echtzeit-Deployment basiert auf einem kontinuierlichen Update-Kreislauf: Das Temperaturfehlermodell wird an vielen Stützpunkten im virtuellen Arbeitsraum ausgewertet, die resultierenden volumetrischen Fehler werden in RBM-typische thermisch bedingte Geometriefehler überführt und mit den statischen Maschinenfehlern überlagert. Die so erzeugte Fehlertabelle wird anschließend auf der Werkzeugmaschine aktualisiert und dieser Kreislauf in regelmäßigen Abständen wiederholt. Grafik: WZL-IQS | RWTH Aachen

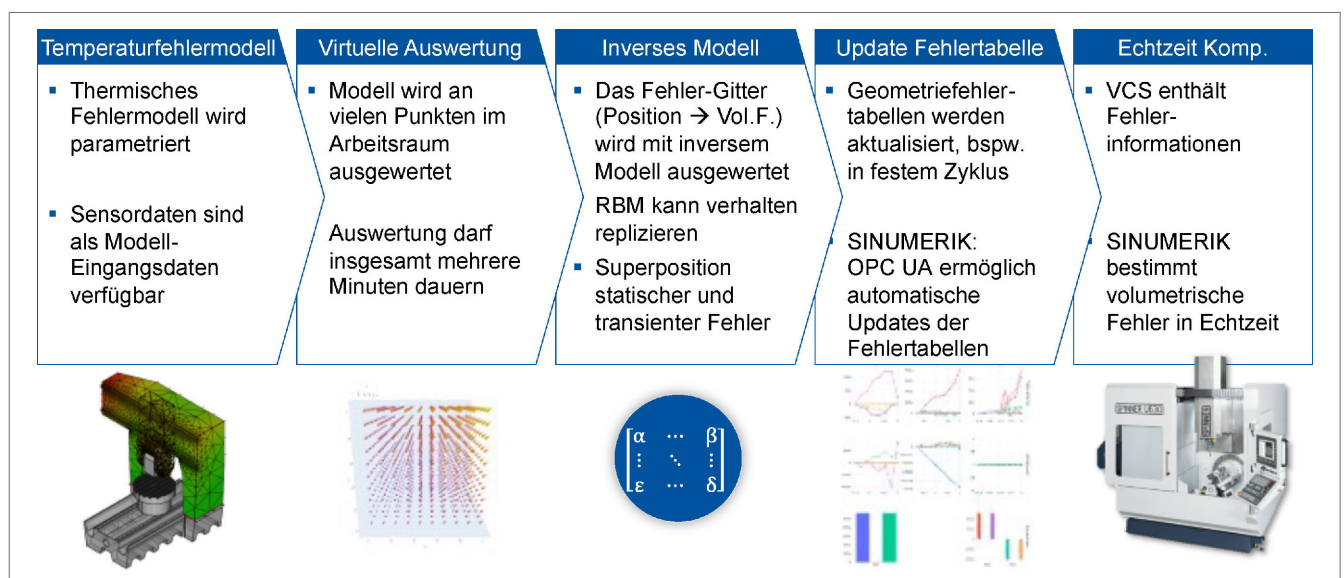


Bild 3 Arbeitsablauf: Überführung transienter (thermischer) Fehler in ein Echtzeit-Starrkörpermodell (hier getestet mit: Siemens Sinumerik und VCS) auf einer Werkzeugmaschine. Grafik: WZL-IQS | RWTH Aachen

statische als auch transiente Fehlerzustände zu hinterlegen. Im Folgenden wird das Verfahren beschrieben und simulativ validiert.

Der entsprechende, in **Bild 2** und **Bild 3** dargestellte Workflow stützt sich auf wenige zentrale Annahmen, von denen einige als Vorwissen gelten, andere im Artikel überprüft werden und manche offen bleiben.

Es wird angenommen, dass ein Starrkörpermodell (Rigid Body Model, RBM) das transiente Fehlerverhalten einer Werkzeugmaschine zu jedem Zeitpunkt hinreichend genau beschreiben kann und dass sich die Ausgabe thermischer Fehlermodelle in RBMkonforme Geometriefehler transformieren lässt. Weiterhin ändern sich thermische Fehler nur auf der Zeitskala mehrerer Minuten; folglich können die in der Steuerung hinterlegten Tabellen geometrischer Fehler in derselben Größenordnung – also in „thermischer Echtzeit“ [34] – automatisch aktualisiert werden. Zwischen zwei Aktualisierungen verändern sich die

Fehler entweder so wenig, dass keine Sprünge in der Werkzeugposition entstehen, oder weitgehend linear, sodass eine lineare Korrektur die Verzögerung kompensieren kann. Da in diesem Beitrag keine Zerspanungsversuche durchgeführt werden, lässt sich diese letzte Annahme nicht endgültig verifizieren.

Unter obiger Annahme langsam variierender thermisch bedingter Fehlerverläufe kann das Fehlerverhalten im gesamten Arbeitsraum der Werkzeugmaschine vorab berechnet werden.

Durch die Transformation sämtlicher Modellinformationen in geometrische Fehlerdaten, deren Superposition zu einem einzigen Satz geometrischer Fehler sowie eine periodische Aktualisierung dieser Informationen an der Werkzeugmaschine lässt sich eine Echtzeit-Fehlerkompensation realisieren.

Für die industrielle Anwendbarkeit sind Echtzeitfähigkeit, die korrekte Kombination verschiedener Fehlermodelle, ein geringer Implementierungsaufwand und die Kompatibilität zu bestehenden Werkzeugmaschinen entscheidend.

Es existiert jedoch keine standardisierte Echtzeit-Kompensationsschnittstelle, die für alle Werkzeugmaschinensteuerungen gilt. Selbst wenn eine solche Schnittstelle vorhanden wäre, ist es schwierig, Modelle zur Prädiktion transienter thermischer Fehler (einschließlich reduzierter Modelle wie des APB-Modells) so zu implementieren, dass sie harte Echtzeitanforderungen erfüllen.

Der vorgestellte hybride Ansatz adressiert dies, indem er transiente Informationen aus Modellen zur Fehlerprädiktion (zum Beispiel Abstracted Physical Body Models, APB [2, 17]) mit statischen Korrekturdaten aus der Maschinenkalibrierung fusioniert. Ziel ist es, volumetrische thermische Fehlerdaten auf die Parameter des RBM zu reduzieren und die entsprechenden Starrkörpermodell Fehlertabellen in Intervallen auf Minuten-Skala, also langsamer als der IPO-Zyklus, per Lookup-Tabellen auf der Maschine zu aktualisieren. Dadurch repräsentiert das in der Steuerung befindliche statische Fehlermodell fortlaufend den aktuellen thermischen Zustand, sodass sowohl statische als auch transiente Fehler kompensiert werden.

3.2 Periodisch aktualisiertes RBM als Vehikel für statische und thermische Fehlerkompensation

Bild 3 zeigt den Ablauf der präsentierten Fehler-Modellierung:

Thermisches Fehlermodell auswerten: Für die betreffende Werkzeugmaschine wird ein thermisches Fehlermodell (zum Beispiel APB) erstellt und an ausgewählten Positionen des Arbeitsraums hinsichtlich transienter volumetrischer Fehler ausgewertet. Die Rechenzeit kann je nach Umfang Sekunden bis wenige Minuten betragen, ohne die thermische Echtzeitgrenze zu überschreiten.

Volumetrisch → geometrisch: Die resultierenden volumetrischen Fehler werden mithilfe des in [35] beschriebenen inversen Modells zur Kalibrierung von Werkzeugmaschinen in geometrische RBM-Fehler überführt und in geometrischen Fehlertabellen abgelegt. Diese bilden die Datengrundlage für RBMbasierte Kompensationssysteme.

Superposition und Bereitstellung: Die aus den transienten volumetrischen Fehlern erzeugten geometrischen Fehler werden mit den aus der statischen Kalibrierung bekannten Fehlerdaten überlagert und in ein von der Maschinensteuerung lesbares Format konvertiert. Über geeignete Kommunikations- und Datentransferschnittstellen (zum Beispiel OPC UA) gelangen diese superponierten Tabellen in die Steuerung und ersetzen dort die bisherigen Tabellen. Die Aktualisierung erfolgt periodisch in thermischer Echtzeit, anstatt eine harte Echtzeitauswertung des thermischen Modells in jedem IPO-Zyklus vorzunehmen.

Das in der Steuerung implementierte System zur geometrischen Fehlerkorrektur nutzt diese Tabellen, um den volumetrischen thermischen Fehler in Echtzeit zu ermitteln und zu kompensieren. Durch das periodische Aktualisieren von geometrischen Fehlertabellen, welche die transienten thermischen Fehler repräsentieren, anstatt einer harten Echtzeitauswertung in jedem IPO-Zyklus, sinken die Anforderungen an den Auswertezyklus des transienten Fehlermodells auf wenige Sekunden pro Berechnung für eine einzelne Maschinenposition bei einem gegebenen Temperaturzustand und ermöglichen damit eine Echtzeitfähige Implementierung der Kompensation thermischer Einflüsse.

Kompensation in der Steuerung: Die Steuerung interpoliert die Tabellen im IPO-Zyklus, berechnet daraus die aktuellen volumetrischen Abweichungen am TCP und kompensiert diese unmittel-

bar im Pfad. Auf diese Weise ist eine echtzeitfähige Implementierung der thermischen Fehlerkompensation möglich, obwohl die Modellauswertung selbst außerhalb des harten Echtzeittakts erfolgt.

Um die Korrektheit und Funktionsfähigkeit dieses Deployment-Ansatzes zu zeigen, wird im nächsten Abschnitt zunächst die Korrektur der Fehler validiert und anschließend die Implementierung und das Deployment des Systems auf einer Sinumerik-Steuerung mittels OPC UA erläutert.

4 Überführung des volumetrischen thermischen Fehlerverhaltens in RBM-Tabellen

Ziel der folgenden Validierung ist es simulativ zu prüfen, ob es die vorgeschlagene hybride Modellierung ermöglicht volumetrische Fehlerdaten verlustfrei auf geometrische Fehler geringerer Dimension abzubilden und an welchen Stellen Restfehler verbleiben. Der Validierungsansatz durchläuft dabei im Wesentlichen dieselben Schritte wie der eigentliche Deployment-Prozess, Bild 3.

Zunächst wird eine virtuelle Werkzeugmaschine mit simuliertem geometrischem Fehlerverhalten versehen, das von einfachen Steigungsfehlern (Pitch Errors) bis hin zum vollständigen Satz von 21 Fehlerparametern reicht.

Dazu wird innerhalb des virtuellen Arbeitsraums ein regelmäßiges Gitter von Maschinenpositionen, den Stützstellen, definiert. An diesen Stützstellen berechnet eine RBM-Implementierung des WZL, genannt „VoluSoft“ [22], auf Basis des Axis-Error-Summation-Approach (AESAs) die volumetrischen Fehlervektoren. VoluSoft wurde bereits erfolgreich gegen VCS verifiziert; Abweichungen zwischen beiden Verfahren treten lediglich bei Fehlern höherer Ordnung auf. Während VCS Fehler höherer Ordnung berücksichtigt, ignoriert VoluSofts AESA diese höheren Ordnungseffekte ganz oder teilweise, was jedoch unter der Annahme kleiner Fehler im Vergleich zu den Achshüben als unkritisch gilt.

Zu den nominalen Stützstellen werden die so berechneten Fehler addiert, um reale Positionen zu simulieren, wie sie beispielsweise mit einem Laser Tracker gemessen oder vom APB-Modell prognostiziert würden. Diese simulierten Ist-Positionen dienen anschließend als Eingabe für das mathematische Modell aus [35]. Nach dem Lösen des beschriebenen Gleichungssystems erhält man die geometrischen Fehlertabellen. Mithilfe der RBM-Implementierung lassen sich daraus erneut volumetrische Fehler berechnen. Stimmen diese volumetrischen Fehler mit dem ursprünglichen Fehlerdatensatz überein, lässt sich folgern, dass die volumetrischen Fehlerinformationen ohne Informationsverlust auf geometrische Fehler geringerer Dimension abgebildet werden können. Wie erwartet trifft dies für Steigungs-, Positionier- und Geradheitsfehler zu, die sich rein positionsabhängig entlang der drei Achsen verhalten.

Im zweiten Schritt werden die Rotationsfehler betrachtet. Für jede Raumrichtung lassen sie sich als dreidimensionale multilineare Polynome darstellen. Die RBM-Annahmen, nach denen Fehler entweder ausschließlich von der Position einer einzelnen Achse abhängen (Positionier- und Geradheitsfehler) oder – im Falle eines Rotationsfehlers – als Hebelarm einer Achse mit einem von der Position einer zweiten Achse abhängigen Wert skaliert werden, können mathematisch in dieser grundlegenden multilinearen Polynomform ausgedrückt werden. Die Koeffizienten $e_{i,j,k}$

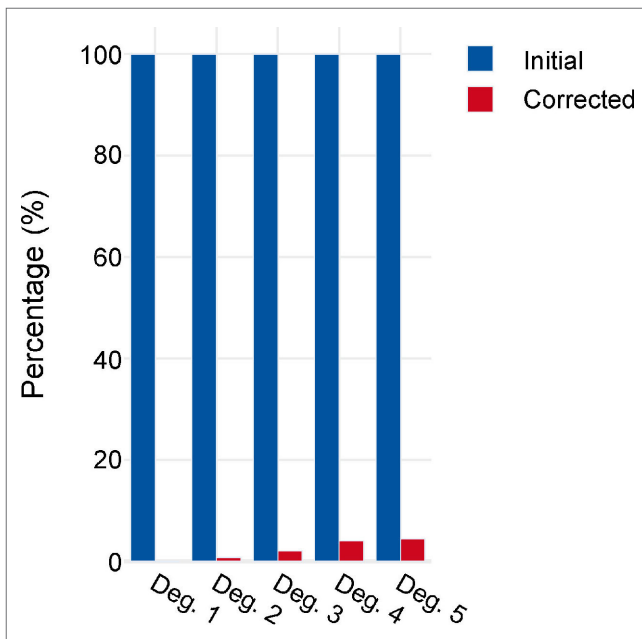


Bild 4 Volumetrische Restfehler der simulierten Fehlerterme Polynome 2. Ordnung. Grafik: WZL-IQS | RWTH Aachen

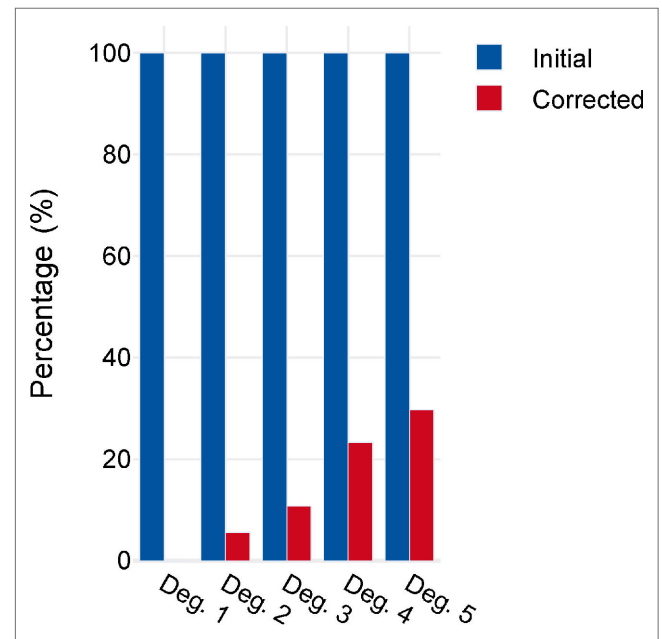


Bild 5 Volumetrische Restfehler der simulierten Fehlerterme Polynome 3. Ordnung. Grafik: WZL-IQS | RWTH Aachen

sind dabei so eingeschränkt, dass sie nur dann ungleich null sein dürfen, wenn mindestens einer der Exponenten i, j, k den Wert 0 und ein zweiter den Wert 0 oder 1 besitzt.

$$E_{3D, tr. \& rot.}(x, y, z) = \begin{pmatrix} \sum_{i,j,k} e_{x, i,j,k} x^i y^j z^k \\ \sum_{i,j,k} e_{y, i,j,k} x^i y^j z^k \\ \sum_{i,j,k} e_{z, i,j,k} x^i y^j z^k \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Darstellung von Werkzeugmaschinenfehlern in Polynomform ist ein gängiger Ansatz in Forschung und Praxis zur Fehleridentifikation und repräsentation [36]. Einerseits lässt sich damit die Anzahl der bei der Kalibrierung zu bestimmenden Unbekannten reduzieren, andererseits besteht die Gefahr einer zu starken Vereinfachung oder von Überanpassungsartefakten (Overfitting) in den Polynomen.

Es überrascht daher nicht, dass volumetrische Fehler, die den zuvor beschriebenen Polynomrestriktionen genügen, sich vollständig in geometrische Fehlertabellen eines RBM überführen lassen. Schwierigkeiten treten erst bei nicht-starrkörperhaftem Verhalten auf – weniger bei Fehleranteilen, die zwar von zwei Achsen abhängen, aber noch niedrige Exponenten aufweisen, stärker jedoch bei höheren Polynomgraden, **Bild 4**, oder bei fehlenden Exponenteneinschränkungen, **Bild 5**. Solches nicht-RBM-konformes Verhalten findet man häufig an Einständer-Maschinen, beispielsweise an Horizontalbohrwerken mit auskragendem Spindelstock. Dort hängt die durchbiegungsbedingte Rotation und Translation der Vertikalachse von der Ausfahrweite der Pinole ab (siehe ISO/TR 16907:2015).

4.1 Superposition der Geometriefehler

Die Überlagerung der geometrischen Fehlerinformationen aus der statischen, konventionellen Maschinenkalibrierung [35] und

der Modellierung der transienten thermischen Fehler wird durch parameterweise Addition realisiert. Prinzipiell lassen sich beliebige weitere Fehlerquellen einbeziehen. Für jeden Stützpunkt i in jeder Fehlertabelle j , jede Achse K und für jede Fehlerichtung d werden die jeweiligen Werte addiert:

$$EdK_{i \sim sup, \sim 1, \dots, m} = \sum_j EdK_{i \sim inp, \sim j, \sim 1, \dots, m} \quad (2)$$

Somit ergibt sich die vollständige Zusammenfassung der thermischen volumetrischen Fehler in die Achsbezogenen-Fehlertabellen, die im nächsten Schritt in thermischer Echtzeit auf der Werkzeugmaschine aktualisiert werden muss, um die Kompensation im laufenden Fertigungsprozess zu realisieren.

5 Implementierung des Deployment-Konzepts an einer Versuchsmaschine mit Sinumerik-Steuerung und VCS

Das zuvor beschriebene Deployment-Konzept ist nur dann für den Einsatz direkt an der Maschine geeignet, wenn die transienten geometrischen Fehldaten mit den bereits ermittelten statischen Fehlerinformationen überlagert werden können und sich der gesamte Aktualisierungsvorgang automatisieren lässt, sodass er in thermischer Echtzeit ausgeführt werden kann. Um die Funktionsfähigkeit der oben vorgestellten Methode unter diesen Einschränkungen zu demonstrieren, wird die Lösung auf einer 5-Achs-Fräsmaschine mit Sinumerik-Steuerung implementiert. Dazu wird in dieser Publikation beschrieben, wie die Kompensationstabellen auf einer Sinumerik-Werkzeugmaschine manuell aktualisiert werden können und daraus eine automatisierte Aktualisierung mittels OPC UA abgeleitet und vorgestellt. Im Rahmen dieser Publikation werden die Tests an der Werkzeugmaschine nicht vorgestellt; der Einsatz [38] und die daraus resultierenden Daten [39] sind separat veröffentlicht.

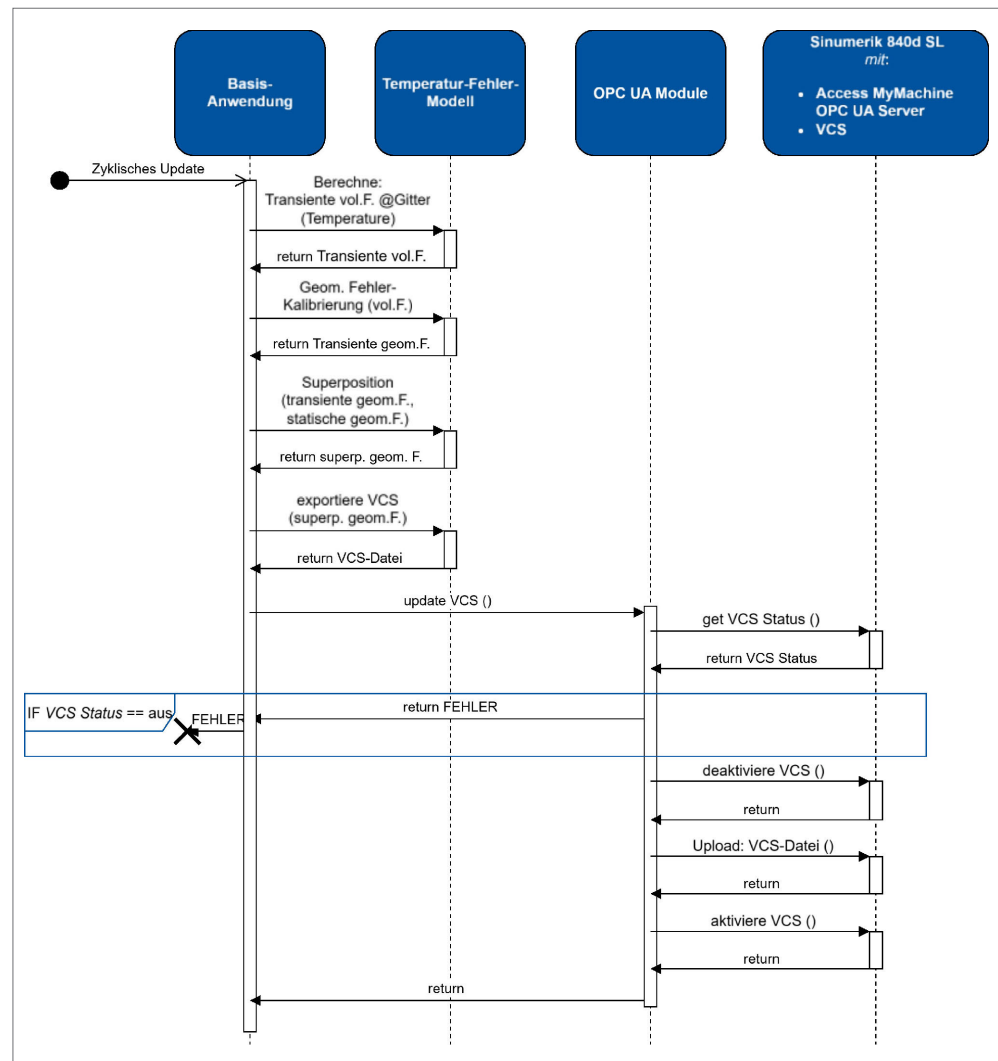


Bild 6 Ablaufdiagramm für die Echtzeit-Kompensation auf einer Sinumerik über OPC UA.
Grafik: WZL-IQS | RWTH Aachen

5.1 Automatisierte Aktualisierung der Kompensationstabellen mittels OPC UA

Auf einer Sinumerik-Werkzeugmaschine erfolgt das manuelle Aktualisieren der Kompensationstabellen in mehreren Schritten. Zunächst wird eine neue Datei in das Steuerungssystem kopiert, wozu erhöhte Zugriffsrechte notwendig sind. Der Dateiname folgt dabei einer Konvention, die eine beliebige Kennziffer enthält. Danach werden über sogenannte Global-User-Data-Variablen (GUD) [23, 40] mehrere Aktionen ausgelöst: Zuerst wird VCS deaktiviert, falls es zuvor eingeschaltet war. Anschließend wählt man durch Eintragen der Kennziffer die einzulesende Datei aus. Wird die Lese-Flag von 0 auf einen anderen Wert gesetzt, liest die Steuerung die Datei ein; bei erfolgreichem Lesevorgang erhöht sich ein Zähler um eins, und die neue Kompensation kann wieder aktiviert werden.

Um diesen Aktualisierungsvorgang zu automatisieren, bietet sich OPC UA als Schnittstelle an. OPC UA ist ein weit verbreiteter Standard, dessen sogenannte „Companion Specifications“ für eine Vielzahl industrieller Automatisierungsgeräte verfügbar sind (siehe IEC TR 62541-1:2020). Über diese Schnittstelle lassen sich Variablen ändern, Funktionen aufrufen und Dateisystemoperationen aus der Ferne ausführen.

Sämtliche zuvor genannten VCS-Variablen können per OPC UA gesetzt werden. Der gesamte Ablauf ist im Detail in **Bild 6** dargestellt. Auch hierzu sind, wie zuvor beschrieben, erhöhte Zugriffsrechte notwendig. Das Überspielen der Kompensationsdatei selbst erfordert jedoch einen Umweg: Nach aktuellem Kenntnisstand lässt sich das relevante Verzeichnis nur manuell, nicht jedoch direkt über OPC UA beschreiben. Es ist aber möglich, dort im Vorfeld manuell eine Kompensationsdatei abzulegen, die auf eine zweite Datei verweist, welche die eigentliche Kompensationstabelle enthält und sich in einem beliebigen, über OPC UA schreibbaren Verzeichnis befindet und somit automatisiert per OPC UA aktualisiert werden kann.

Die entwickelte Methode zur Echtzeitkompensation thermischer Fehler mittels OPC UA ist auf der gewählten Maschine anwendbar und führt zu dem gewünschten Ergebnis. Das Verfahren stützt sich auf etablierte Standards, wie OPC UA, und ist daher leicht erweiterbar auf Maschinen mit anderen Steuerungssystemen als Sinumerik. Die Implementierung stellt einen Proof-of-Concept auf einer spezifischen Maschine mit spezifischer Steuerung dar; dass das Konzept lässt sich jedoch grundsätzlich auch auf andere Steuerungssysteme übertragen.

6 Fazit zur Echtzeitkompensation von thermischen Maschinenfehlern mittels OPC UA

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren vorgestellt, das die Kompensation thermischer Fehler direkt auf der Werkzeugmaschine für Echtzeitanwendungen ermöglicht. Grundlage des Ansatzes ist die thermische Trägheit der Maschinenstruktur: Statt die thermischen Fehlermodelle mit harten Echtzeitanforderungen auszuführen, werden die transienten volumetrischen Fehler nur in „thermischer Echtzeit“, das bedeutet innerhalb weniger Minuten, berechnet, anschließend zu geometrischen Fehlertabellen reduziert und in längeren Zeitabständen in die Steuerung eingespielt. Es hat sich gezeigt, dass geometrische Fehlerinformationen ein geeignetes Mittel sind, um transiente thermische Effekte abzubilden.

Für den praktischen Nachweis wurde eine Implementierung entwickelt, die VCS-Fehlertabellen einer Sinumerik-Steuerung über OPC UA aktualisiert. Damit ist der automatisierte Austausch der Korrekturdaten ohne manuellen Eingriff möglich.

Das Konzept der additiven Überlagerung statischer geometrischer Fehler und transienter thermischer Volumenfehler wurde erfolgreich realisiert: Beide Fehlerarten werden zunächst homogen zu geometrischen Fehlertabellen transformiert und anschließend zusammengeführt. Die Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass das Starrkörpermodell (RBM) im Allgemeinen als geeignete Basis für diese Form der Fehlerdarstellung dient; gleichzeitig wurde analysiert, welche Fehlerverläufe sich damit nicht vollständig beschreiben lassen. Eine simulativ durchgeführte Validierung bestätigt das Konzept.

Schließlich wurde der gesamte Workflow an einer Spinner-Maschine mit Sinumerik-Steuerung umgesetzt. Die Kombination aus vorhandenen Steuerungsfunktionen (hier: VCS), OPC UA-Kommunikation und dem erarbeiteten Update-Mechanismus belegt, dass sich eine thermische Fehlerkompensation allein mit bereits etablierter Technologie realisieren lässt.

Das vorgestellte Verfahren ist daher auch jetzt schon geeignet um die Messunsicherheit bei Messungen auf der Werkzeugmaschine (engl. „On-Machine-Measurements“ OMM) durch Fehlerkompensation zu reduzieren, da dort nur diskrete Punktmessungen erforderlich sind und keine kontinuierlichen Bahnverläufe kompensiert werden müssen. Dementsprechend reicht die implementierte periodische Aktualisierung der Fehlertabellen ohne Glättung aus.

Bei fertigen Prozessen, wie der Zerspanung, können diese nicht geglätteten, diskreten Änderungen der Fehlertabellen jedoch die Oberflächenqualität beeinträchtigen oder im Extremfall das Werkstück beschädigen, da es bei großen thermischen Änderungen zu sprunghaften Werkzeugbewegungen im Mikrometerbereich kommen könnte.

Eine Möglichkeit, Positionssprünge zu vermeiden, bestünde darin, stets zwei aktive Geometriefehler-Tabellen auf der Maschine vorzuhalten und zwischen ihnen zeitabhängig zu interpolieren. Sobald eine neue Tabelle verfügbar ist, würde die Interpolation dann jeweils zwischen dieser und der zweitneuesten Datei erfolgen. Auf diese Weise ließen sich Aktualisierungen der Fehlertabellen glätten, während lediglich eine geringe Verzögerung in Kauf genommen werden müsste. Entsprechende Erweiterungen der vorgestellten Methodik sind für nachfolgende Forschungsaktivitäten geplant.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2023 Internet of Production – 390621612.

LITERATUR


- [1] Emonts, D.; Sanders, M. P.; Dahlem, P. et al.: Virtuelle Klimatisierung/ Virtual Climatization. *wt Werkstattstechnik online* 111 (2021) 11-12, S. 887–892
- [2] Dahlem, P.; Emonts, D.; Sanders, M. P. et al.: A review on enabling technologies for resilient and traceable on-machine measurements. *Journal of Machine Engineering* 20 (2020) 2, S. 5–17
- [3] Gao, W.; Ibaraki, S.; Donmez, M. A. et al.: Machine tool calibration: Measurement, modeling, and compensation of machine tool errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* (2023), S. 104017
- [4] Schmitt, R. H.; Peterek, M.; Morse, E. et al.: Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Annals* 65 (2016) 2, S. 643–665
- [5] Mayr, J.; Jedrzejewski, J.; Uhlmann, E. et al.: Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals* 61 (2012) 2, S. 771–791
- [6] Wang, Y.; Cao, Y.; Qu, X. et al.: A review of the application of machine learning techniques in thermal error compensation for CNC machine tools. *Measurement* 243 (2025), S. 116341
- [7] Pelegrino, D.; Santos, R.; Coelho, R.: Experimental evaluation of energy consumption in machine tools: a case study for a two-spindle turning center. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2019
- [8] Khan, K.; Su, C.-W.; Zhu, M. N.: Examining the behaviour of energy prices to COVID-19 uncertainty: A quantile on quantile approach. *Energy (Oxford, England)* 239 (2022), p. 122430
- [9] Enescu, A.-G.; Szeles, M. R.: Discussing energy volatility and policy in the aftermath of the Russia–Ukraine conflict. *Frontiers in Environmental Science* 11 (2023)
- [10] Cannon, A. J.: Twelve months at 1.5 °C signals earlier than expected breach of Paris Agreement threshold. *Nature Climate Change* 15 (2025) 3, S. 266–269
- [11] Bevacqua, E.; Schleussner, C.-F.; Zscheischler, J.: A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20-year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nature Climate Change* 15 (2025) 3, S. 262–265
- [12] Wang, H.; Jiao, S.; Bu, K. et al.: Digital transformation and manufacturing companies' ESG responsibility performance. *Finance Research Letters* 58 (2023), S. 104370
- [13] Shokrani, A.; Arrazola, P. J.; Biermann, D. et al.: Sustainable machining: Recent technological advances. *CIRP Annals* 73 (2024) 2, S. 483–508
- [14] Abubakr, M.; Abbas, A. T.; Tomaz, I. et al.: Sustainable and Smart Manufacturing: An Integrated Approach. *Sustainability* 12 (2020) 6, S. 2280
- [15] Blaser, P.: Adaptive Learning Control for Thermal Error Compensation, ETH Zurich, 2020
- [16] Brecher, C.; Wissmann, A.: Optimierung des thermischen Verhaltens von Fräsmaschinen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009) 6, S. 437–441
- [17] Dahlem, P.: Hybrid modeling of transient volumetric machine tool errors for virtual climatization, RWTH Aachen University, 2023
- [18] McKeown, P. A.; Loxham, J.: Some aspects of the design of high precision measuring machines. *CIRP Annals* 22 (1973) 1, S. 139
- [19] Schwenke, H.; Franke, M.; Hannaford, J. et al.: Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *CIRP Annals* 54 (2005) 1, S. 475–478
- [20] Busch, K.; Kunzmann, H.; Waldele, F.: Numerical Error-Correction of a Coordinate Measuring Machine, 1984, S. 278–282
- [21] Baum, C.; Brecher, C.; Klatte, M. et al.: Thermally induced volumetric error compensation by means of integral deformation sensors. *Procedia CIRP* 72 (2018), S. 1148–1153
- [22] Montavon, B.; Dahlem, P.; Schmitt, R. H.: Effektive Analyse von Werkzeugmaschinenkalibrierdaten*/Effective analysis of machine tool calibration data. VoluSoft as a showcase for user-friendly visualization and processing of machine tool calibration data. *wt Werkstattstechnik online* 108 (2018) 11-12, S. 755–759
- [23] Siemens AG: Funktionsbeschreibung VCS „Volumetric Compensation System“ NCK-Dokumentation, 2017

- [24] Dr. Johannes Heidenhain GmbH: Optionen und Zubehör für TNC-Steuerungen, 2025
- [25] Fanuc GE CNC Europe S.A.: Functions for 3-dimensional Error Compensation, 2025
- [26] Cao, L.; Park, C.-H.; Chung, S.-C.: Real-time thermal error prediction and compensation of ball screw feed systems via model order reduction and hybrid boundary condition update. *Precision Engineering* 77 (2022), S. 227–240
- [27] Narendra Reddy, T.; Shanmugaraj, V.; Vinod, P. et al.: Real-time Thermal Error Compensation Strategy for Precision Machine tools. *Materials Today: Proceedings* 22 (2020), S. 2386–2396
- [28] Guevel, F.; Viprey, F.; Euzenat, C. et al.: Development and performance evaluation of real-time geometric error compensation through position feedback modification in 5-axis machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 137 (2025) 11–12, S. 5565–5584
- [29] Liu, Q.; Guo, H.; Ma, Y. et al.: Real-time error compensation of a 5-axis machining robot using externally mounted encoder systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120 (2022) 3–4, S. 2793–2802
- [30] Chen, T.-C.; Chang, C.-J.; Hung, J.-P. et al.: Real-Time Compensation for Thermal Errors of the Milling Machine. *Applied Sciences* 6 (2016) 4, S. 101
- [31] Esmaeili, S. M.; Mayer, J. R. R.: CNC table based compensation of inter-axis and linear axis scale gain errors for a five-axis machine tool from symbolic variational kinematics. *CIRP Annals* 70 (2021) 1, S. 439–442
- [32] Thiem, X.; Großmann, K.; Mühl, A.: Modular Control Integrated Correction of Thermoelastic Errors of Machine Tools Based on the Thermoelastic Functional Chain. *Advanced Materials Research* 1018 (2014), S. 411–418
- [33] Li, J.; Mei, B.; Shuai, C. et al.: A volumetric positioning error compensation method for five-axis machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 103 (2019) 9–12, S. 3979–3989
- [34] Thiem, X.; Kauschinger, B.; Mühl, A. et al.: Challenges in the Development of a Generalized Approach for the Structure Model Based Correction. *Applied Mechanics and Materials* 794 (2015), S. 387–394
- [35] Sanders, M. P.; Bodenbenner, M.; Dahlem, P. et al.: Laser Tracker-Based on-the-Fly Machine Tool Calibration without Real-Time Synchronization. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7 (2023) 2, S. 60
- [36] Slamani, M.; Mayer, J. R. R.; Cloutier, G. M.: Modeling and experimental validation of machine tool motion errors using degree optimized polynomial including motion hysteresis. *Experimental Techniques* 35 (2011) 1, S. 37–44
- [37] Sanders, M. P.: Volumetric Error Model for Online Machine Tool Compensation. Dissertation, RWTH Aachen University, 2025
- [38] Sanders, M. P.; Bodenbenner, M.; Wolfschläger, D. et al.: Machine tool thermal error experiment, 2025
- [39] Siemens AG: Sinumerik 840D sl - CNC Commissioning: NC, PLC, Drive Commissioning Manual, 2019

Mark P. Sanders, M.Sc. 
mark.sanders@wzl-iqs.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Matthias Bodenbenner 

Dr.-Ing. Dominik Wolfschläger 

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt 

WZL-IQS | RWTH Aachen University
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen

Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt

Fraunhofer Institut für Produktionstechnologie IPT
Steinbachstr. 17, 52074 Aachen

Maithili Deshmukh, M.Sc. 

AxD LLC, 3960 Crooks RD, Troy, MI 48084

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)