

# Energieeffizientes Kaltstartverhalten spanender Werkzeugmaschinen

## Kompensation thermischer Einflüsse mit Methoden des Maschinellen Lernens

Deborah Walz<sup>1</sup>, Andreas Wächter<sup>2</sup>, Stefan Tomov<sup>1</sup>, Konrad Heimbach<sup>3</sup> und Matthias Weigold<sup>2</sup>

**Abstract:** Die Kompensation thermischer Einflüsse und daraus resultierender geometrischer Verlagerungen spielt eine bedeutende Rolle bei der Gewährleistung einer hohen Bearbeitungsqualität von Werkstücken in Zerspanungsprozessen. Übliche Vorgehensweisen zur Reduktion thermischer Verlagerungen während der Produktion gehen mit einem erheblichen Energiebedarf einher oder modellieren die komplexen Zusammenhänge thermischer Einflüsse nur ungenügend. Methoden des Maschinellen Lernens stellen einen vielversprechenden Ansatz zur Modellierung dar. Es wird eine Lösung angestrebt, die aufwandsarm auf Produktionsmaschinen ähnlicher Bauart übertragen werden kann. Derzeit ist ungeklärt, ob eine explizite oder implizite Modellierung der zeitlich multivarianten Daten eine zufriedenstellende Lösung bietet. Als besonders herausfordernd stellt sich die Verfügbarkeit von ausreichend vielen Datenbeispielen zur Modellierung der relevanten Größen dar.

**Keywords:** Machine Learning, Neural Network, Energy Efficiency, Compensation, Machining

## 1 Einleitung

Im Rahmen des laufenden Forschungsprojekts ETA im Bestand werden anwenderfreundliche Technologien und Methoden zur Steigerung der Energieeffizienz im Fabrikbestand entwickelt. Im Betrachtungsrahmen liegt die metallverarbeitende Industrie, die eine prägende Rolle in der deutschen Industrielandschaft einnimmt [Em13]. Für unterschiedliche Wirtschaftszweige der metallverarbeitenden Industrie strebt das Projekt Werkzeuge zur Realisierung von Einsparpotenzialen von 25–40 % durch die Verknüpfung von Einzelprozessen mit der Produktionsumgebung an. Auf Prozessebene spielen energieeffizienz-steigernde Lösungen von Maschinenherstellern, beispielsweise von Werkzeugmaschinen wie Dreh- und Fräsmaschinen, eine relevante Rolle. In diesem Zusammenhang werden Energieeffizienzpotenziale im Pausen- und Kaltstartverhalten von Werkzeugmaschinen in der Zerspanung adressiert.

---

<sup>1</sup> anacision GmbH, Albert-Nestler-Straße 19, 76131 Karlsruhe, [deborah.walz@anacision.de](mailto:deborah.walz@anacision.de)

<sup>2</sup> Technische Universität Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Otto-Berndt-Straße 2, 64287 Darmstadt, [a.waechter@ptw.tu-darmstadt.de](mailto:a.waechter@ptw.tu-darmstadt.de)

<sup>3</sup> EMAG GmbH & Co. KG, Austraße 24, 73084 Salach, [kheimbach@emag.com](mailto:kheimbach@emag.com)

Die sukzessive Abschaltung von Nebenaggregaten wie Kühlschmierstoffpumpen in Pausenzeiten stellt eine wirkungsvolle Maßnahme zur Energieeinsparung dar [AKS10, Bre12]. Allerdings wird die Temperaturverteilung in der Maschine unter anderem durch den Kühlschmierstoff beeinflusst [WB06]. Der Stillstand der Kühlschmierstoffzirkulation kann lokale Temperaturänderungen und in der Folge thermisch bedingte Verformungen in der Maschine hervorrufen. Resultierend können geforderte Bearbeitungsqualitäten gegebenenfalls nicht mehr erreicht werden. Um eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit zu erzielen, werden beim Einschalten und in Pausenzeiten üblicherweise Warmfahr- und Warmhalteprogramme an Werkzeugmaschinen gefahren, in denen die Maschinenachsen bewegt werden. Obwohl keine Bearbeitung stattfindet, gehen diese Programme mit erheblichem Energiebedarf der Maschine einher. Beispielhaft können durch den Verzicht von täglich 180 Minuten Warmhaltedauer bei einer Leistungsaufnahme von 4 kW pro Tag und Maschine 12 kWh eingespart werden.

Das Ziel ist Methoden zu entwickeln, die den Verzicht auf Warmfahr- und Warmhalteprogramme ermöglichen oder diese verkürzen, um so die aus diesen Programmen resultierenden Verbräuche zu reduzieren. Hierbei wird der Ansatz verfolgt, auftretende Verlagerungen maschinenseitig während der Bearbeitung zu kompensieren. Durch Bildung eines im Betrieb ausführbaren Modells sollen die Zusammenhänge der verschiedenen Parameter zu der Maschinenverformung beschrieben und zu beliebigen Zeitpunkten für die Kompensation nutzbar gemacht werden. Hierzu werden neuartige Methoden des Maschinellen Lernens hinsichtlich ihrer Eignung analysiert. Im weiteren Vorhaben wird untersucht, ob die Zusammenhänge thermischer Einflüsse an spanenden Werkzeugmaschinen mit hinreichender Güte zur Kompensation abgebildet werden können und mit welchen Datenmengen und welchem Aufwand sich diese Modelle auf ähnlich konstruierte Maschinen mit ähnlichen Zielgrößen übertragen lassen.

## **2 Konstruktive und steuerungsseitige Maßnahmen zur thermischen Kompensation**

Bei der Herstellung präziser Geometrien mittels Zerspanung spielt das thermische Verhalten der genutzten Werkzeugmaschine eine wesentliche Rolle. Darum findet die Stabilisierung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen bereits in der Konstruktion besondere Beachtung.

Um die thermisch bedingte Verlagerung an den für die Zerspanung relevanten Punkten gering zu halten, werden die Komponenten nach ihrem Wärmedehnungsverhalten symmetrisch angeordnet [DHS07]. Weiter werden in der Konstruktionsphase die Wärmeübergangs- und Wärmeausdehnungskoeffizienten der eingesetzten Materialien beachtet, um den Wärmegang und die einhergehende Verlagerung abzuschwächen, zu verzögern oder gezielt zu nutzen [DHS07]. In dieser Phase der Entwicklung werden auch modellbildende Verfahren wie die Finite-Elemente-Methode eingesetzt, um Bauteile frühzeitig konstruktiv in Bezug auf das thermische Verhalten optimieren zu

können [Sc11]. Weiterhin werden Maschinenkomponenten wie Motoren gekühlt [DHS07]. Eine verbreitete Regelstrategie ist es, die Temperatur des Kühlmediums der Umgebungstemperatur nachzuführen und so ausgeprägte Kältenester und eine inhomogene Temperaturverteilung zu vermeiden. Zuletzt wird der verbleibenden thermischen Verlagerung steuerungsseitig entgegengewirkt. Hierzu wird meist auf Basis eines Temperatursensors eine Anpassung des Maschinenkoordinatensystems einer Achse vorgenommen. Der Zusammenhang zwischen Temperatur und Verlagerung wird experimentell ermittelt [WB06] und mathematisch linear hinterlegt. Dieses Vorgehen führt zu guten Ergebnissen, wenn die gemessene Stelle einen dominanten Einfluss auf die thermische Verlagerung hat und die Bearbeitungsparameter konstant sind. Bei nicht gleichbleibender Maschinenbelastung oder unterschiedlichen Werkstück- und Bearbeitungsparametern liefert diese Art der Kompensation kein hinreichendes Ergebnis.

### **3 Kompensation thermischer Einflüsse mittels Maschinellen Lernen**

Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung eines Modells, das mithilfe von gemessenen Sensordaten die Auswirkungen des thermischen Verhaltens der Maschine abbildet.

#### **3.1 Voruntersuchungen des komplexen thermischen Verhaltens**

Es wird der Ansatz verfolgt, die auftretende Verlagerung maschinenseitig während der Bearbeitung zu kompensieren. Das Ausmaß und die Richtung der Verlagerung und somit der notwendigen Korrekturwerten hängen von vielfältigen Parametern und deren zeitlichen Verlauf ab [WB06]. Solche Parameter sind beispielhaft die Drehzahl der Maschinenspindel, Temperaturunterschiede zwischen Maschinenkomponenten, deren zeitlicher Verlauf, sowie der eigentliche Bearbeitungsprozess für ein spezifisches Werkstück. Zur Erfassung dieser Größen ist verschiedenartige Sensorik nötig. Die experimentelle Untersuchung der Zusammenhänge an vier betrachteten Maschinen zeigt, dass sich die Einflussgrößen heterogen und zeitlich variant auf das Verformungsverhalten auswirken.

Abb. 1 zeigt dies in einer Messreihe über einen Zeitraum von 66 h ausgehend von einer kalten Maschine mit nachfolgend konstanter Belastung. Beim thermischen Verhalten sind tageszeitabhängige Schwankungen der Umgebungstemperatur sowie eine Aufheizphase der Motorspindel und der Werkzeugaufnahme erkennbar, wobei zudem alle Temperaturwerte mit der Umgebungstemperatur schwanken. Die infolge des Temperaturgangs auftretenden Verlagerungen unterscheiden sich hinsichtlich der Betrachtungspunkte. An der Werkstückspindel ist beim Einschalten eine schnelle Verlagerung in positiver x-Richtung erkennbar wobei die Position im weiteren Verlauf annähernd konstant bleibt. An der Werkzeugträgerkonsole findet beim Einschalten eine deutlich langsamere Verlagerung in negativer x-Richtung statt, die im weiteren Verlauf

mit der Umgebungstemperatur schwankt, wobei zudem ein schleichender Abwärtstrend erkennbar ist. Ausschlaggebend für die Qualität des Werkstücks ist die Überlagerung dieser beiden Einzelverlagerungen. Die Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück wird anfangs durch die Spindelverlagerung und im weiteren Verlauf durch die Verlagerung des Werkzeugträgers dominiert. Ein direkter Zusammenhang einer thermischen Messgröße zur Verlagerung ist nicht erkennbar.

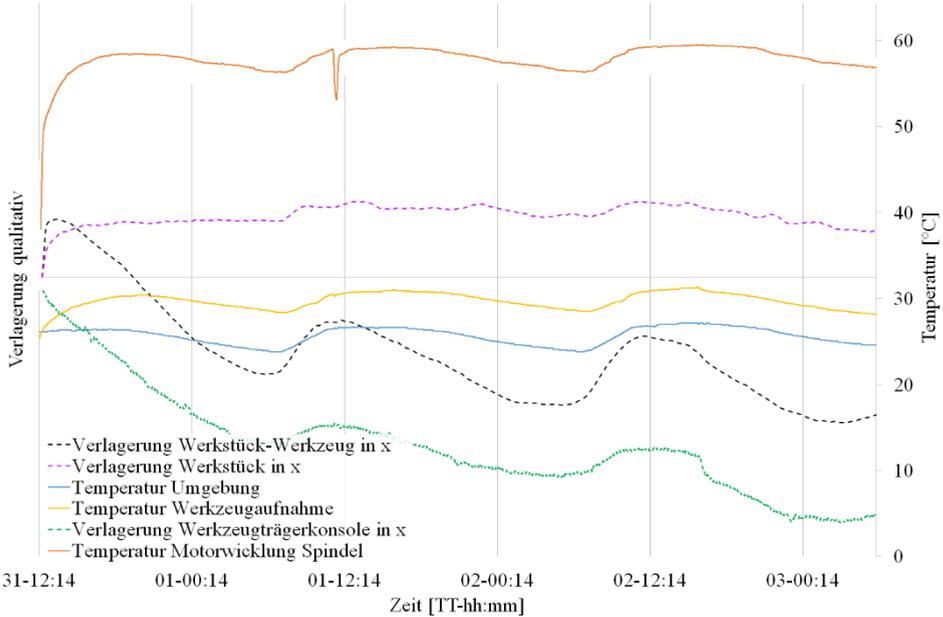


Abb. 1 Verlagerung mit Einschaltverhalten und konstanter Belastung über 66 h

### 3.2 Diskussion vorliegender Rahmenbedingungen und Daten

Als Grundlage für die Modellierung werden  $N$  Sensordaten, welche das thermische Verhalten der Maschine charakterisieren, zu verschiedenen Zeitpunkten  $t \in \{1, \dots, T\}$  gemessen. Hierbei entspricht  $t = 1$  dem ausgeschalteten Zustand und  $t = T$  dem warmgefahrenen Zustand der Maschine. Die restlichen Zeitpunkte  $t \in \{2, \dots, T - 1\}$  bilden den Übergang zwischen diesen beiden Zuständen der Maschine ab. Da das thermische Verhalten über die verschiedenen Zeitpunkte hinweg durch mehrere Sensordaten abgebildet wird, bietet es sich an, die  $N$  Sensordaten zu jedem Zeitpunkt als  $N$ -dimensionale Vektoren zu beschreiben. Hierdurch lassen sich die vorliegenden Sensordaten zu jedem Zeitpunkt als multivariate Zeitreihen auffassen:

$$X_t = (X_{1,t}, \dots, X_{N,t}) \in \mathbb{R}^N, \quad t \in \{1, \dots, T\}. \quad (1)$$

Weiterhin können Sensordaten kurze Messlücken sowie unterschiedliche Abtastraten beinhalten. Durch eine Imputation werden diese Messlücken durch plausible Werte ersetzt. Eine Angleichung der Abtastrate und Zeitstempel der einzelnen Werte wird durch Methoden der Harmonisierung wie Up-/Downsampling erreicht.

### 3.3 Modellierung mit künstlichen neuronalen Netzen

Klassische Modelle sind nicht ausreichend, um die Korrekturwerte bei der Bearbeitung spezifischer Werkstücke unter Einbeziehung der hohen Parametervielfalt und Systemkomplexität mit geringer Latenz herzuleiten. Insbesondere die zeitliche Änderung multivariater Einflussparameter sowie der kontinuierliche Verlauf der Kompensation in bestimmter Richtung müssen berücksichtigt werden. Um einen Ansatz zu entwickeln, welcher unter diesen Anforderungen eine hohe Güte erreicht, werden modell-basierte Verfahren betrachtet, deren Zielgröße die Verlagerung der Maschine am Werkstück in  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Richtung bildet. Somit lassen sich aus diesem Modell direkt Korrekturparameter ableiten und an die Steuerung übergeben.

Die verfügbare Datenmenge, der Grad des a-priori nötigen Fachwissens, die Komplexität des Modells (einstellbar durch Modellparameter) sowie das Modellierungsverfahren an sich sind Stellschrauben, welche Einfluss auf die Modellgüte haben und deren Zusammenspiel im Laufe des Projekts untersucht wird. Beispiele für mögliche Modellierungsverfahren multivariater Zeitreihen sind rekurrente neuronale Netze oder autoregressive Ansätze. Da eine modellbasierte Übertragbarkeit auf ähnliche Maschinen mit geringem Anpassungsaufwand angestrebt wird, wird zudem durch Ansätze des Transfer Learnings evaluiert, inwieweit ein trainiertes Modell für ähnlich konstruierte Maschinen – womöglich mit einer deutlich reduzierten Datenmenge - nachgelernt werden kann [Be11, SQ10]. Ist die verfügbare Datenmenge nicht groß genug, um eine hohe Güte zu erreichen, werden weniger datenintensive Modellierungsansätze oder Verfahren erprobt, sowie weiteres Fachwissen über thermische Zusammenhänge integriert.

Neuronale Netze bieten eine besonders hohe Flexibilität in der Konfiguration der Modellkomplexität, der Modellierung mehrere Zielvariablen sowie einer Übertragbarkeit auf neue Maschinen. Die Übertragbarkeit wird durch Festhalten der Modellparameter in frühen Schichten eines neuronalen Netzes bei gleichzeitigem Nachlernen der höheren Schichten erreicht. Aus diesen Gründen werden in einem ersten Schritt neuronale Netze untersucht, wobei anzumerken ist, dass diese für die Abbildung stark nicht-linearen Verhaltens viele Datenpunkte benötigen. Andererseits können zeitliche Zusammenhänge durch manuelles Modellieren mit Fachexperten in die Modelle integriert werden. So kann beispielsweise bekanntes Verhalten bei Temperaturgängen an spezifischen Messpunkten dem Modell in Form von Aggregationen zur Verfügung gestellt werden. Ein Nachteil hierbei ist der hohe manuelle Aufwand, welcher sowohl für die initiale Modellbildung als auch für die Übertragbarkeit auf ähnliche Maschinen zu beachten ist.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Um das thermische Verhalten einer Werkzeugmaschine stabil zu halten, werden Warmfahr- und Warmhalteprogramme eingesetzt, welche mit einem erheblichen Energiebedarf der Maschine einhergehen. Zudem wird mit klassischen Methoden aus dem Maschinenbau versucht, die thermisch bedingte Verlagerung durch Korrekturwerte während der Bearbeitung zu kompensieren. Diese Korrekturwerte hängen jedoch von einer Vielzahl an Parametern ab, welche zudem über die Zeit variieren, sodass als Konsequenz die Verlagerungen ohne energetisch aufwändige Warmfahr- und Warmhalteprogramme nicht hinreichend gut kompensiert werden können.

Unter Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen soll ein Modell entwickelt werden, das die Auswirkungen des thermischen Verhaltens der Maschine abbildet. Dieses Modell kann für eine Kompensation der Verlagerung der Maschine zu einem beliebigen Zeitpunkt genutzt werden, wodurch sich der Energiebedarf der Maschine deutlich verringert, indem auf Warmlauf- und Warmhalteprogramme verzichtet werden kann oder diese verkürzt werden können. Die Herausforderungen bestehen darin, mit den verfügbaren Daten hinreichend genaue Modelle zu erstellen, die zudem über eine hohe Generalisierbarkeit verfügen, sodass die Modelle auf ähnlich konstruierte Maschinen mit geringem Aufwand übertragbar sind.

Die modellbasierte Anwendung fokussiert eine einzelne Maschine. Um das Modell während des Betriebs einer Maschine zu nutzen, werden die gemessenen Sensordaten einem Industrie-PC zur Verfügung gestellt. Auf diesem sollen mit dem hinterlegten Modell die Korrekturwerte zur Kompensation der thermischen Verlagerung berechnet und anschließend direkt in die Steuerung der Maschine integriert werden. Eine Integration weiterer Systeme, wie ERP oder andere Maschinen, ist nicht nötig. Hieraus kann sich ein günstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis auch für Unternehmen mit niedrigen bis mittleren Reifegraden der Digitalisierung und Vernetzung ergeben.

## 5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Projekts ETA im Bestand (Förderkennzeichen: 03EN2048A-I) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und die Projektbetreuung durch den Projektträger Jülich (PtJ).

## 6 Literaturverzeichnis

[AKS10] Abele, E.; Kuhrke, B.; Rothenbücher S.: Maximierung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen. Zerspanungstechnik 09/10, S. 26-29, 2010.

- [Be11] Bengio, Y. et al.: Deep Learners Benefit More from Out-of-Distribution Examples. In (JMLR W&CP): Proceedings of the Fourteenth International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, Fort Lauderdale, S. 164-172, 2011.
- [Bre12] Brecher, C. et al.: Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb – EWOTeK, Apprimus, Aachen, 2012.
- [DHS07] Donmez, M.A.; Hahn, M.H.; Soons, S.A.: A Novel Cooling System to Reduce Thermally-Induced Errors of Machine Tools. In: CIRP Annals 56/1, S. 521-524, 2007.
- [Em13] Emec, S. et al.: Analyse von Potenzialen der Material- und Energieeffizienz in ausgewählten Branchen der Metall verarbeitenden Industrie, 2013.
- [GFS07] Graves A.; Fernández S.; Schmidhuber J.: Multi-dimensional Recurrent Neural Networks. In (de Sá J.M., Alexandre L.A., Duch W., Mandic D.): Artificial Neural Networks – ICANN 2007. Lecture Notes in Computer Science, Vol 4668. Springer, Berlin u.a., 2007
- [HS97] Hochreiter S.; Schmidhuber J.: Long Short-Term Memory. Neural Computation 9/97, S. 1735-1780, 1997.
- [Sc11] Scharschmidt, K.-H.: Modellbasiertes Verfahren zur Kompensation thermoelastischer Verlagerungen von Werkzeugmaschinen, PZH Produktionstechnisches Zentrum, Hannover, 2011.
- [SQ10] Pan, S. J.; Yang, Q.: A Survey on Transfer Learning. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22/10, S. 1345-1359, 2010.
- [WB06] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 5. Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität, Springer, Berlin u.a., 2006.