



Energieeffizienz, Werkzeugmaschinen, Simulation

Effiziente Fluidtechnik für Werkzeugmaschinen

Ermittlung und Reduktion des Energiebedarfs am Beispiel des Kühlwassersystems

B. Denkena, H.-C. Möhring, F. Hackelöer, L. Hülsemeyer, D. Dahlmann, E. Augenstein, J. Nelles, A. Grigoleit

Der Energiebedarf von Werkzeugmaschinen soll im Rahmen des Verbundprojektes „NCplus“ durch eine wertschöpfungsorientierte Ansteuerung signifikant gesenkt werden. Der Fachbeitrag zeigt Einsparpotentiale eines Bearbeitungszentrums anhand durchgeführter Messreihen mit den Schwerpunkten Kühlung und Kühlschmierstoff auf. Im Anschluss wird eine neuartige Kühlstrategie vorgestellt und bewertet. Die intelligente Regelung des Kühlwasserkreislaufs erfolgt über thermische Modelle des Aggregates und der Verbraucher.

Increase in machine tool efficiency – Detection and reduction of power requirement by means of the cooling system

A significant reduction of the power requirement of machine tools is subject to the joint research project NCplus. The suggested approach employs a process-oriented control to accomplish major improvements. The paper focuses on the cooling and fluid systems which have been identified to offer high optimization potential. New cooling strategies are presented and evaluated. Furthermore thermal models of the cooling device and machine parts are developed and included in the control system.

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena, Dr.-Ing. Hans-Christian Möhring,
Dipl.-Ing. Felix Hackelöer, Dipl.-Ing. Lars Hülsemeyer,
Dipl.-Ing. Dominik Dahlmann
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2, D-30823 Garbsen
Tel. +49 (0)511 / 762-2533 oder -18316
Fax +49 (0)511 / 762-5115
E-Mail: denkena@ifw.uni-hannover.de
oder dahlmann@ifw.uni-hannover.de
Internet: www.ifw.uni-hannover.de

Dr.-Ing. Eckhardt Augenstein, Dipl.-Ing. Jürgen Nelles
perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH
Am Viadukt 3, D-52066 Aachen
Tel. +49 (0)241 / 412-500 06
E-Mail: j.nelles@perpendo.de
Internet: www.perpendo.de

Dipl.-Ing. Axel Grigoleit
Hydac International GmbH
Industriegebiet, D-66280 Sulzbach/Saar
Tel. +49 (0)6897 / 509-1113
E-Mail: axel.grigoleit@hydac.com
Internet: www.hydac.com

Info

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt NCplus wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

1 Einleitung

In der Entwicklung von Werkzeugmaschinen spielte die Energieeffizienz in der Vergangenheit lediglich eine untergeordnete Rolle. In Zeiten steigender Energiepreise, zu erwartenden gesetzlichen Regelungen sowie eines verstärkten Umweltbewusstseins kommt diesem Thema jedoch eine wachsende Bedeutung zu. So beziehen beispielsweise Großanwender wie die Automobilindustrie die tatsächlichen Lebenszykluskosten vermehrt in die Investitionsplanung ein. Dem Bereich der Werkzeugmaschinen werden mittelfristig umsetzbare Einsparpotentiale von 30 % zugesprochen, wobei ein Großteil der Optimierung von Nebenaggregaten zukommt [1].

In dem Projekt NCplus verfolgen namhafte Unternehmen aus der Industrie zusammen mit dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover die neuartige Strategie, Energie durch die bedarfsgerechte Ansteuerung und Abschaltung von Maschinenkomponenten einzusparen (**Bild 1**).

Im Folgenden wird ein Ausschnitt aus den durchgeführten Energieflussanalysen präsentiert, aus denen das weitere Vorgehen im Projekt abgeleitet wird. Der Fokus des Artikels liegt auf der Entwicklung eines intelligenten Fluidschanks, der die Medien lastabhängig zur Verfügung stellt. Neben Maßnahmen im Bereich der Kühlschmierstoffzufuhr wird im Besonderen ein neuartiges Lüfterkühlsystem vorgestellt, welches eine signifikante Reduzierung des Energieeinsatzes garantiert. Ein onlinefähiges Knotenpunktmodell erlaubt durch die Simulation des thermischen Verhaltens eine Prädiktion der Temperaturen und Kühlleistung, wodurch intelligente Eingriffe ermöglicht werden.



Bild 1. Einsparmaßnahmen innerhalb des Projektes „NCplus“

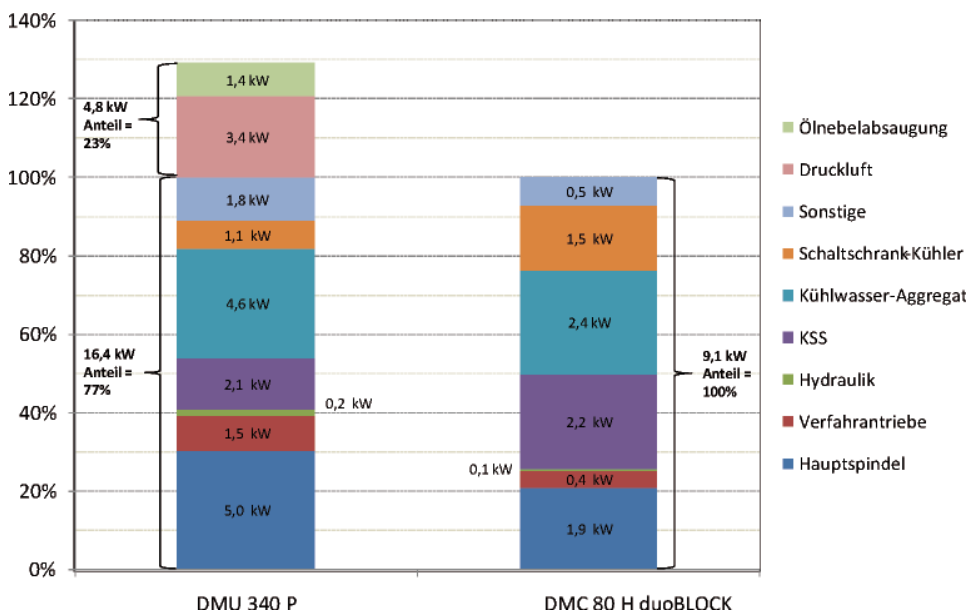


Bild 2. Mittlere Leistungsaufnahme der vermessenen Werkzeugmaschinen nach Baugruppen

2 Prozess- und Energieflussanalyse

Im Zuge der Prozess- und Energieflussanalyse wurden umfangreiche messtechnische Untersuchungen zur Bilanzierung und Bewertung des Status-Quo an zwei Werkzeugmaschinen unterschiedlicher Baugröße der Firma Deckel Maho Pfronten GmbH durchgeführt. Neben einer fünf-stündigen Kupferzerspanung im Produktionseinsatz einer DMU 340 P ist eine DMC 80 H duoBLOCK (Referenzmaschine) unter Labor-Bedingungen vermessen worden. Hierbei wurde ein 20-minütiger Zyklus repräsentativer Bearbeitungsarten gewählt.

Als Ergebnis der Energieflussanalyse liegen detaillierte Kenntnisse über die Aufteilung der eingebrachten Energie

und die resultierenden Abwärmeströme vor. Defizite bei der Effizienz des Energieeinsatzes sind auf diese Weise aufgedeckt worden. Die darauf basierenden abzuleitenden Verbesserungsansätze zeigen ein Einsparpotential in einer Größenordnung von 20 % bis 35 %.

Eine Gegenüberstellung der mittleren Leistungsaufnahme beider Maschinen zeigt **Bild 2**. Infolge der unterschiedlichen Ausstattung ist die Referenz bei der Gesamtheit der vergleichbaren Baugruppen angesetzt – eigene Drucklufterzeugung und Kabinenabluft sind optionale Komponenten.

Hinsichtlich der Energieeffizienz zeigt **Bild 2**, dass ein Großteil der eingebrachten Energie auf die Prozesskonditionierung (Kühlung, Schmierung) entfällt, wobei den Haupt-

antrieben (Hauptspindel, Vorschubachsen) lediglich ein Anteil vergleichbar mit dem der aktiven Kühlaggregate zukommt. Demgemäß sind auch die absehbaren Einsparpotentiale wesentlich bestimmt durch Maßnahmen zur Verbesserung der Nebenantriebe. In der **Tabelle** sind die geschätzten Einsparpotentiale im Bereich der Fluidtechnik und der Kühlung bezogen auf die Gesamtleistungsaufnahme aufgelistet.

3 Volumenstromregelung und drehzahlgeregelte KSS-Hochdruckpumpen

Um in modernen Zerspanprozessen den Kühlschmierstoff (KSS) an die Wirkstelle zu bringen und von dort Späne abzutransportieren, ist eine hohe kinetische Energie erforderlich. Dazu wird das Medium mit hohem Druck durch Düsen oder Kühlmittelkanäle des Werkzeugs gefördert. Für die Bereitstellung des Mediums werden Schraubenspindelpumpen verwendet, die als Konstantdruckpumpen so ausgelegt sind, dass auch für große Kühlmittelmengen ausreichend Volumen zur Verfügung steht. Erlauben die eingesetzten Werkzeuge nur einen kleineren Volumenstrom, so wird das überschüssige Kühlmittel über Druckbegrenzungsventile in den Vorratsbehälter zurück geleitet. Die zuvor aufgebrauchte Antriebsenergie wird vollständig dissipiert und führt zu einer Erwärmung des KSS im Vorratsbehälter. Je nach Anwendung ist ein weiterer Energieeinsatz notwendig, um den KSS wieder rückzukühlen – die Druckbegrenzungsregelung wirkt sich demnach zweifach negativ auf die Energieeffizienz aus. Insbesondere bei Werkzeugen mit kleinen Durchmessern für die innere Kühlmittelzufuhr ergibt sich daher ein ungünstiges Verhältnis von hydraulischer Leistung (Nutzen) zu eingesetzter elektrischer Energie. Bei der DMC 80 H duoBLOCK mit 40 bar Pumpendruck variiert der Wirkungsgrad zwischen 20 % für einen Ø 5 mm-Bohrer und 70 % für einen Bohrer mit Ø 60 mm.

Maßnahme	Einsparung
Volumenstromregelung IKZ (inkl. Drehzahlregelung)	1 – 2 %
Freiluftkühlung ohne Kompressor	10 – 14 %
Optimierung Kühlwasser-Pumpen	2 – 3 %
Alternative Elektronik-Kühlung	5 – 10 %
Alternative Blasluft-Bereitstellung	5 – 8 %
Gesamt	23 – 37 %
Variabler Volumenstrom der Önebelabsaugung*	~ 2 %

(*) optionale Ausstattung

In neueren Systemen kommen drehzahlgeregelte Pumpenantriebe zum Einsatz, bei denen der Druck als Regelgröße dient. Damit wird das Fördervolumen dem Prozess soweit angepasst, dass kein überschüssiger Volumenstrom über das Druckbegrenzungsventil abströmt. Im Forschungsprojekt NCplus wird eine Erweiterung dieses Ansatzes verfolgt, die ein zusätzliches Einsparpotential verspricht. Als Regelgröße für die Drehzahl wird hier nicht der Druck, sondern der Volumenstrom genutzt. Da in einem fortschreitenden Bearbeitungsprozess (etwa Tieflochbohren) der Volumenstrom bei gleichem Druck vermindert wird, ermöglicht diese Regelvariante, die Bearbeitung mit einem geringeren Druck (weniger Energieeinsatz) bei gleichzeitig höchster Prozesssicherheit zu beginnen. Daneben bietet diese Vorgehensweise die Möglichkeit, verstopfte KSS-Kanäle und sogar Werkzeugbrüche über die Veränderung des Volumenstroms zu detektieren. Um das Einsparpotential aus dieser Regelung zu nutzen, müssen von den Werkzeugherstellern die Volumenströme vorgegeben werden, die für die jeweiligen Bearbeitungsprozesse erforderlich sind.

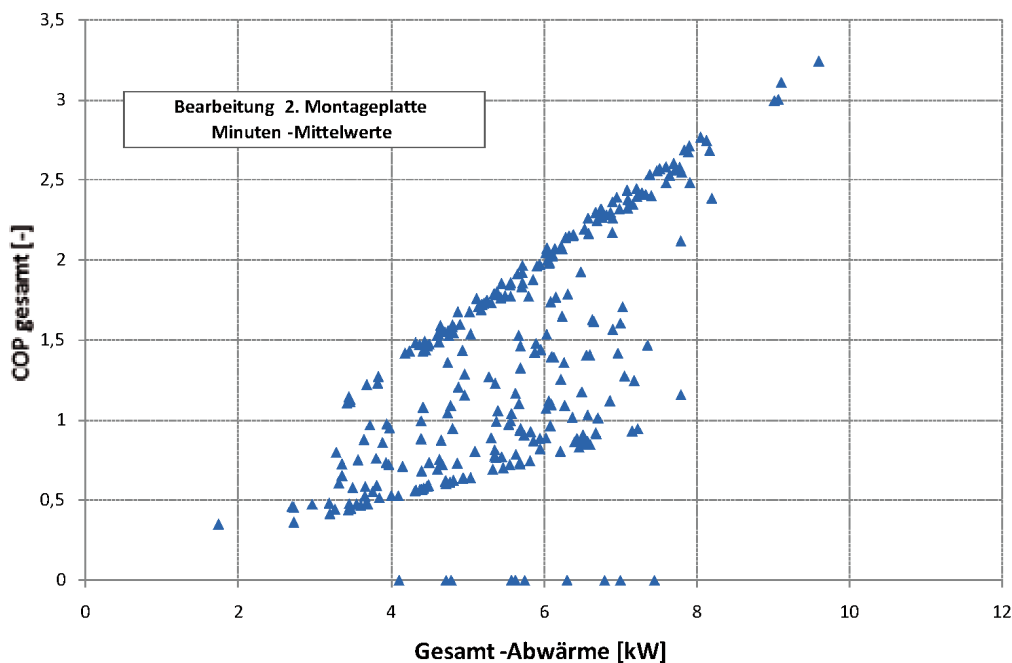


Bild 3. Coefficient Of Performance (COP – Leistungsziffer) im Verhältnis zur Gesamt-Abwärme (Werkzeugmaschine: DMU 340 P)

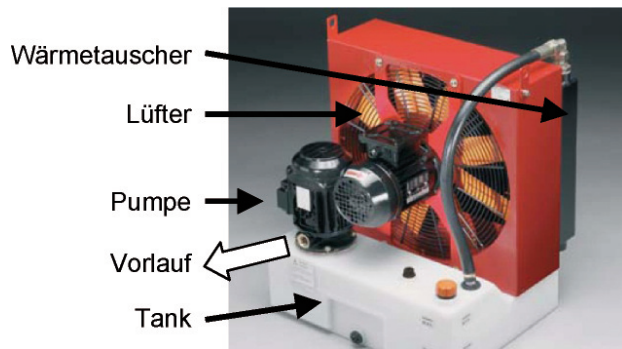


Bild 4. Luftkühlsystem der Firma Hydac

4 Auslegung eines energieeffizienten Kühlwassersystems

4.1 Effizienz-Bewertung

Eine wesentliche Bedeutung zur Steigerung der Gesamteffizienz kommt den aktiven Kühlsystemen zu. In beiden betrachteten Maschinen ist neben einem Kühlwassersystem zur Wärmeabfuhr der thermisch belasteten Antriebe ein separater Schaltschrankkühler zur Verlustwärmeabfuhr der Elektronik im Einsatz. Beide Systeme sind mit einem internen Kältemittelkreislauf ausgestattet, da das Temperaturniveau der Wärmeaufnahme an den zu kühlenden Komponenten unter Umgebungszustand liegt. Bezogen auf die mittlere Energieaufnahme des Kühlwasseraggregates hat der Antrieb der mechanischen Kältemittelverdichter an beiden Werkzeugmaschinen einen Anteil von zwei Dritteln.

Die Effizienz der Kühlung lässt sich mit Hilfe des Coefficient Of Performance (COP – Leistungsziffer) als Verhältnis von Nutzen (Kühlleistung) zu Aufwand (Antriebsleistung) darstellen [2]. In **Bild 3** ist der Gesamt-COP über dem Gesamtabwärmestrom bei der Kupferbearbeitung aufgetragen. Es zeigt sich eine Punktwolke, die im Bereich zweier begrenzter Wertebänder verdichtet ist. Diese Ausbildung ist auf die Funktionsweise des Kühlwasser-Aggregates zurückzuführen, in der der Kompressor im Aussetzbetrieb arbeitet. Dabei wird einem Vorratsbehälter mit Kühlflüssigkeit durch einen Kompressor Wärme entzogen, bis eine untere Temperaturgrenze erreicht ist. Danach schaltet der Kompressor ab, bis der Temperaturanstieg des Mediums einen erneuten Start erforderlich macht. Das Beispiel der Motorspindel mit einer elektrischen Nennleistungsaufnahme von 52 kW als Hauptwärmequelle zeigt, dass die tatsächlich abgerufene Leistung während des gesamten industriellen Referenzprozesses nur in 10 % der Bearbeitungszeit eine Marke von 20 kW übersteigt. Demzufolge wird das auf den maximalen Betriebspunkt ausgelegte Kühlwasseraggregat gegenüber seiner Nennkühlleistung von 16 kW mittels Aussetzbetriebs überwiegend in Teillast betrieben; der gemittelte COP beträgt lediglich 1,1 – mögliche Werte liegen bei einem COP von 6 [3].

Die Anzahl der Schaltvorgänge eines Kompressorkühlers ist konstruktionsbedingt auf 10–12 pro Stunde begrenzt. Müsste diese kritische Anzahl durch die Vorgabe einer hohen Genauigkeit – beziehungsweise eines zu kleinen Vorratsspeichers – überschritten werden, kommt ein anderes Konzept zum Einsatz. In diesem Fall läuft der Kompressor im Dauer-

betrieb. Die überschüssig verdichtete Kältemittelmenge wird über einen Heißgas-Bypass entspannt und im kurzen Umlauf zurückgeführt, ohne eine Kühlwirkung zu erbringen. Auf diese Weise lässt sich zwar das geforderte Temperaturniveau erreichen, aber die anteilig aufgebrauchte Antriebsenergie wird vollständig dissipiert.

4.2 Sparsames Luftkühlssystem

Im Forschungsprojekt NCplus wird ein anderer Weg für die Kühlung der Spindel verfolgt. Statt eines Kompressorkühlaggregates kommt ein Luftkühlssystem zum Einsatz. Hier wird die Wärme aus der Spindel über einen Luft-/Flüssigkeitswärmetauscher, der durch ein Axialgebläse angeströmt wird, unmittelbar an die Umgebung abgegeben (**Bild 4**). Ein Kompressor ist nicht mehr erforderlich, wodurch sich eine deutliche Energieeinsparung ergibt.

Diesem erheblichen Vorteil steht eine Beschränkung des Systems gegenüber: Es können nur Vorlauftemperaturen bis etwa 5 K über der Umgebungstemperatur erreicht werden. Schon mit den heute üblichen Spindeln ist dies bei Umgebungstemperaturen bis circa 30 °C bei geringen Leistungseinbußen problemlos möglich. Im Rahmen von NCplus wird darüber hinaus eine Spindel entwickelt, die auch bei höheren Temperaturen betrieben werden kann.

Eine weitere Eigenschaft, die ebenfalls beachtet werden muss: Da Luftkühlssysteme die Wärme unmittelbar an die Umgebung abgeben, ergibt sich eine „umgebungsgeführte Regelung“ dieser Systeme. Für viele Anwendungsfälle kann so bereits eine ausreichende Regelgenauigkeit erreicht werden. Für hochgenaue Werkzeugmaschinen, die eine exakte Temperaturführung erfordern, wird im Rahmen von NCplus ein Luftkühlssystem erprobt, mit dem über eine Drehzahlregelung des Lüfters die Vorlauftemperatur exakt eingestellt und kontrolliert werden kann. Damit sind die Regelung einer konstanten Vorlauftemperatur, die Regelung anhand einer Führgröße (Maschinenbett) und erweiterte, prädiktive Regelstrategien möglich.

Erste Versuche zeigen eine Energieeinsparung von circa 70 % im Vergleich zu einem Kompressorkühlssystem im Aussetzbetrieb auf. In **Bild 5** ist zu erkennen, dass die Vorlauftemperatur bei gleichen Prozessparametern deutlich gleichmäßiger verläuft als bei dem Kompressorkühlaggregat, wodurch die Genauigkeit der Maschine ansteigt. Außerdem bieten die Luftkühlssysteme bei der Geräuscentwicklung und insbesondere bei den Beschaffungskosten einen deutlichen Vorteil.

Ein weiterer Aspekt bei der Energieeffizienz der Kühlsysteme sind die Druckverluste, die in den vom Kühlmedium durchströmten Leitungen auftreten. Mit steigender Kühlmittelumwälzung kann zwar eine größere Wärmemenge abgeführt werden, die Druckverluste nehmen dadurch jedoch überproportional zu. Eine einfache Maßnahme zur Verminderung der Leistungsaufnahme der Pumpe ist daher die optimale Dimensionierung der Kühlmittelleitungen.

5 Thermische Modellierung

Bisherige thermische Modelle von Maschinenkomponenten wurden überwiegend entworfen, um geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Temperaturverteilung abzuleiten oder das Längenwachstum zu kompensieren [4–6]. Bei

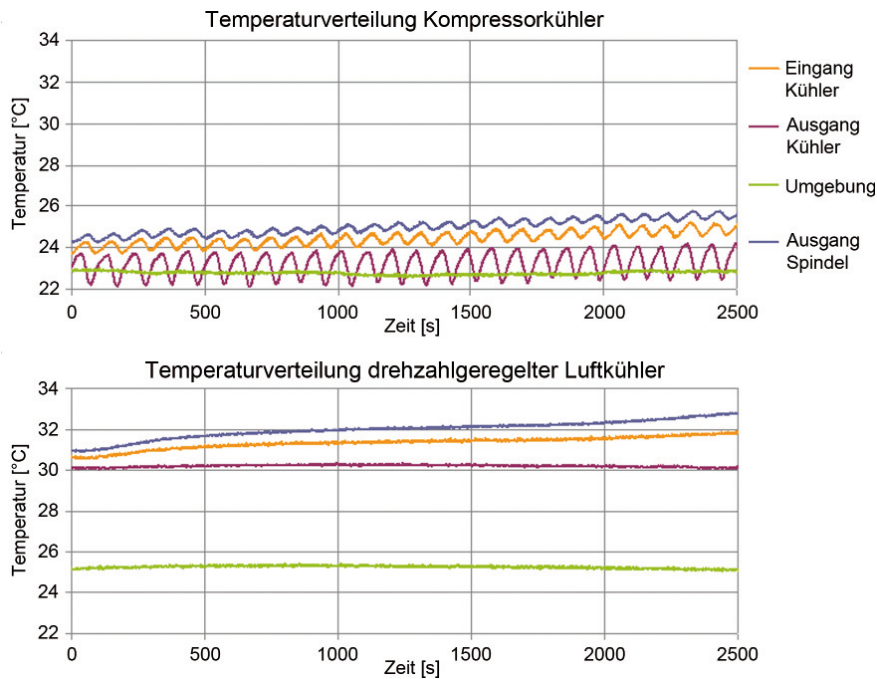


Bild 5. Vergleich zwischen Kompressorkühler und Luftkühlsystem

diesen Ansätzen ist das Kühlmedium als ideale Temperatursenke modelliert, wodurch keine Wechselwirkungen mit dem Kühlaggregat nachgebildet werden können. Um weitere Einsparungen bei den Kühlaggregaten untersuchen zu können, muss jedoch der gesamte Kreislauf betrachtet werden. Hierzu wurden Modelle nach dem Differenzenverfahren erstellt, welche das Fluid einbeziehen und die Rücklauftemperatur zur Verfügung stellen.

Eine Motorspindel wird als Hauptwärmequelle in vierzig diskrete Elemente aufgeteilt, denen im kalorimetrischen Schwerpunkt eine Temperatur zugeordnet wird. Die Übertragungsvorgänge sind mit Hilfe der Elektroanalogie als Widerstände in einem Knotenpunktplan beschrieben. Die Methode bietet im Vergleich zur Finite-Elemente-Methode den Vorteil der Onlinefähigkeit. Elf der vierzig Knoten entfallen dabei auf das Fluid und sind über gerichtete Leitwerte miteinander verbunden, um die Wärmeströme der Festlager und

des Stators zum Kühlwasser hin zu erfassen. In den Bereichen der Lagerung und des Stators sind unterschiedliche Übertragungsmodelle miteinander verglichen und bewertet worden [6–8]. Mit dem daraus abgeleiteten Modell kann die Temperaturverteilung der Versuchsspindel mit hoher Genauigkeit simuliert werden.

Bild 6 stellt die gemessenen und die berechneten Temperaturverläufe einer Sprungantwort im Leerlauf von 18 000 min⁻¹ gegenüber, wobei A das werkzeugseitige und B das motorseitige Lager kennzeichnet. Der maximale Fehler liegt bei den betrachteten Messpunkten unter 1 °C. Die gemessene Vorlauftemperatur dient als Modelleingang und steigt bei dem Versuch auf 40 °C an. Außerdem ist die Temperaturverteilung des Modells im stationären Zustand dargestellt, wobei die Temperaturen des Fluids nicht abgebildet sind. Mit Hilfe der Messung sollen die Einflüsse des vorgestellten Lüfterkühlsystems auf die Spindel analysiert werden. Die

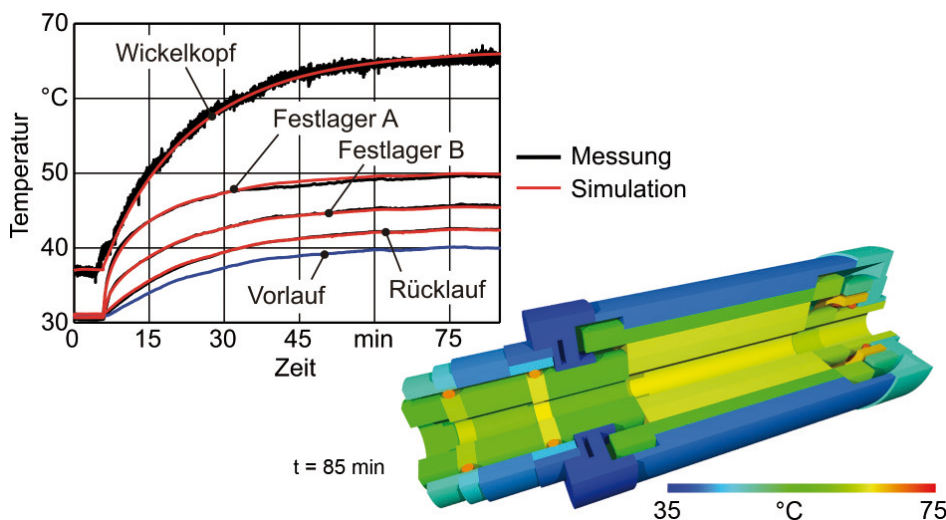


Bild 6. Sprungantwort bei einer Vorlauftemperatur von 40 °C

höhere Vorlauftemperatur, bedingt durch die umgebungsgeführte Kühlung, darf zu keiner Beeinträchtigung der Lebensdauer von Lagern und Motor führen.

Die Modellierung schafft ein besseres Verständnis und dient der Auslegung und Entwicklung der Motorspindel. Zudem bildet die Kombination mit einem Modell des Kühlwassersystems die thermische Dynamik des gesamten Kühlsystems ab und ermöglicht so den Einsatz vorausschauender Regelstrategien sowie Untersuchungen zu deren Nutzen. Durch die Integration zusätzlichen Prozesswissens aus dem CAM-System kann die Kühlung dann lastabhängig vorgenommen werden. So lässt sich zum Beispiel die Warmlaufphase durch eine anfänglich geringere Wärmeabfuhr verkürzen. Eine weitere denkbare Anwendung ist die gezielte Regelung der kritischen Lager- und Wickelkopftemperaturen, wodurch das Längenwachstum der Spindel beeinflusst werden kann. Da weitere gekühlte Komponenten wie die Achsantriebe hinzukommen können, gilt es, eine individuelle Kühlung für jeden einzelnen Kühlzweig beziehungsweise jede Kühlgruppe zu erreichen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Effizienzanalysen der beiden untersuchten Bearbeitungszentren zeigen das bedeutende Einsparpotential im Bereich der Nebenaggregate für Werkzeugmaschinen. In ersten Testergebnissen mit einem neu entwickelten Kühlsystem konnten – bezogen auf die Baugruppe – erste Einsparungen von bis zu 70 % erreicht werden. Die Anschaffungskosten des Systems liegen weit unter denen des herkömmlichen Aggregates und zeigen, dass Effizienz nicht zwangsläufig kostspielig sein muss. Dabei darf das Zusammenspiel der neuen Kühlung mit den unterschiedlichen, zu kühlenden Komponenten nicht außer Acht gelassen werden. So gilt es eine neue Hauptspindel zu konstruieren, die auf einem höheren Temperaturniveau betrieben werden kann. Die thermische Modellierung dient hier nicht nur als Werkzeug in der Entwicklung, sondern schafft auch Möglichkeiten neuer Regelstrategien, die zu einer höheren Stabilität führen. Neben diesen Einsparmaßnahmen werden im Projekt NCplus weitere Potentiale, etwa eine alternative Elektronik Kühlung, genutzt. □

Literatur

[1] N. N.: BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung): Abschlussbericht – Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion. Chemnitz: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. 2008

[2] N. N.: DIN EN 255–3. 1997. Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern. Absatz 6.5.4. Berlin: Beuth-Verlag 1997

[3] N. N.: Machbarkeitsstudie SUMMERHEAT: Boulevard Berlin. Berliner Energieagentur GmbH 2008

[4] Großmann, K.; Jungnickel, G.: Prozessgerechte Bewertung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen. Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, Technische Universität Dresden, 2006

[5] Möhring, H. C.: Reaktionsschnelle Instandsetzung von Formen mit einer transportablen hybridkinematischen Bearbeitungseinheit. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2008

[6] Findekle, J.: Steigerung der Genauigkeit von HSC-Fräsmaschinen durch Kompensation axialer Verlagerungen bei Hochfrequenzspindeln. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2000. Aachen: Shaker-Verlag 2000

[7] Bossmanns, B.; Tu, J. F.: A thermal model for high speed motorized spindles. Journal of Machine Tools & Manufacture 39 (1999) Nr. 9, S. 1345–1366

[8] Gebert, K.: Ein Beitrag zur thermischen Modellbildung von schnell drehenden Motorspindeln. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, 1997. Aachen: Shaker-Verlag 1997