

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

BETREUT VOM



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Energieeffizienz, Werkzeugmaschinen

Energieeffiziente Kühlsysteme für Werkzeugmaschinen

Konzept für eine bedarfsorientierte Kühlwasserversorgung

E. Augenstein, J. Nelles, A. Wurm

Im Rahmen des durch das BMBF geförderten Verbundforschungsprojekts „NCplus“ werden die Potentiale zur Energieeinsparung in Werkzeugmaschinen analysiert und Lösungen zur Effizienzsteigerung abgeleitet. Bei den durchgeführten Untersuchungen stehen zunächst Fräsmaschinen im Mittelpunkt, angestrebt wird aber auch eine Übertragung auf andere Maschinentypen. Neben der Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur wertschöpfungsorientierten Ansteuerung der einzelnen Maschinen-Aggregate werden Lösungen zur Verbesserung einzelner Baugruppen entwickelt. Im Mittelpunkt dieses Beitrags steht eine intelligente Konzeptionierung des Kühlsystems. Die Betriebsweise von Kompressor und Förderpumpe wird durch eine bedarfsgerechte Ansteuerung beziehungsweise Regelung an den Kühlbedarf der aktiven Verfahrentriebe angepasst, womit sich bemerkenswerte Energieeinsparungen erreichen lassen. Ein thermisches Modell des Kühlsystems dient der Validierung und Bewertung des entwickelten Konzepts.

Energy efficient cooling systems for machine tools - A concept for a demand-driven cooling water supply

As part of the research project NC+ funded by the Federal Ministry of Education and Research, the potentials for energy savings in machine tools are analyzed and measures to increase efficiency are derived. The investigations are focused on milling machines. However, a transfer to other types of machines is intended. Besides the approach of a value adding oriented control of the different machine units, solutions to improve individual components are developed. The focus of this paper is put on an intelligent conception of the cooling system. Remarkable

reductions of power consumption can be reached by cooling strategies, which regulate both the circulation pump and the compressor according to the cooling demand. A thermal model of the cooling system is used for validation and assessment of the developed concept.

1 Einleitung

Im Verbundforschungsprojekt NCplus verfolgen namhafte Unternehmen aus der Industrie zusammen mit dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover das Ziel, durch eine wertschöpfungsorientierte Ansteuerung der Maschinen-Aggregate und die Neukonzeptionierung einzelner Baugruppen die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen deutlich zu steigern. Die Ergebnisse der zu Projektbeginn durchgeführten Energieflussanalyse sowie daraus abgeleitete Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz wurden bereits in [1] und [2] ausführlich dargestellt. Der hier vorliegende Beitrag greift diese Ergebnisse kurz auf und konzentriert sich anschließend auf das zentrale Kühlsystem der betrachteten Referenzmaschine. Ausgehend von den Analyse-Ergebnissen wird ein Konzept vorgestellt, das eine bedarfsgerechte und effizientere Kühlwasserversorgung erlaubt. Das Konzept wird mithilfe einer dynamischen Simulationen bewertet und die erreichbaren Energieeinsparungen werden quantifiziert.

2 Effizienzbewertung des Kühl-Aggregats

Im Rahmen des Projekts wurden unter anderem die Energieflüsse einer „DMC80H duoBlock“ der Firma Deckel Maho Pfronten GmbH auf Grundlage eines Referenzprozesses typischer Bearbeitungsschritte messtechnisch erfasst. Aus der Analyse der Messwerte lassen sich detaillierte Kenntnisse über den Verbleib der eingebrachten Energie gewinnen. **Bild 1** zeigt die prozentuale Aufteilung der Leistungsaufnahme innerhalb der DMC80H während eines Referenzprozesses ohne Späneingriff.

Hinsichtlich der Energieeffizienz zeigt sich, dass ein Großteil der aufgenommenen Energie auf die Prozesskonditionierung durch Nebenantriebe in der Maschinenperipherie entfällt. Die aktiven Antriebe – hierzu gehören die Hauptspindel und die Verfahrantriebe – nehmen mit etwa einem Viertel einen verhältnismäßig kleinen Anteil an der Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine ein. Auffallend ist, dass die Kühlung der aktiven Antriebe (26%) sowie des

Dr.-Ing. Eckardt Augenstein,
Dipl.-Ing. Jürgen Nelles, Andreas Wurm
perpendo Energie- und Verfahrenstechnik GmbH
Am Viadukt 3, D-52066 Aachen
Tel. +49 (0)241 / 412-500 00
E-Mail: j.nelles@perpendo.de
Internet: www.perpendo.de

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.

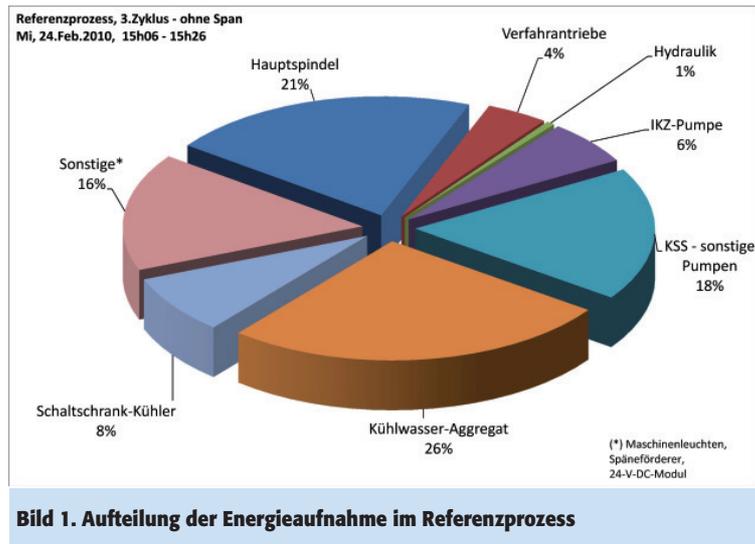


Bild 1. Aufteilung der Energieaufnahme im Referenzprozess

Schaltsschranks (8%) etwa ein Drittel der insgesamt aufgewendeten Energie in Anspruch nehmen. Dementsprechend sind auch die möglichen Einsparpotentiale wesentlich bestimmt durch Verbesserungsansätze bei den Neben-Aggregaten, vor allem bei der Kühlung. Bei deutlich energieintensiveren Prozessen mit Spaneingriff nimmt die Hauptspindel einen Anteil von bis zu 60% ein, während der absolute Verbrauch der Neben-Aggregate nahezu konstant bleibt.

Die im Projekt untersuchten Werkzeugmaschinen verfügen jeweils über ein Kühlwassersystem zur Wärmeabfuhr der thermisch belasteten Antriebe sowie einen autarken Schaltsschrankkühler zur Verlustwärmeabfuhr der Elektronikbauteile. **Bild 2** verdeutlicht die mittlere Wirkleistung des entsprechenden Kühl-Aggregats zur Kühlung der aktiven Antriebe der DMC80H. Anhand des Profils lassen sich eindeutig Kühlwasserpumpe und Kältemittel-Verdichter zuordnen. Der Verdichter nimmt etwa zwei Drittel der eingesetzten Energie auf, die unregelmäßige Pumpe verbraucht mit etwa 750 W das restliche Drittel.

Der Kältemittel-Verdichter läuft im Dauerbetrieb, die überschüssige Fördermenge wird bei Teillast über ein Heißgas-

Bypass-Ventil entlassen und auf die Saugseite des Verdichters zurückgeführt. Dies stellt unter den gegebenen Anforderungen an die Temperaturstabilität die kostengünstigste Lösung zur Teillastregelung dar. Allerdings wird die im Teillastbetrieb aufgewendete Verdichter-Arbeit – rund zwei Drittel der Leistung im Förderbetrieb – vollständig dissipiert, also ohne Nutzen als Abwärme an die Maschinenhalle abgeführt. Der eigentliche Förderbetrieb findet nur in einem Bruchteil der Gesamtbetriebszeit statt (vergleiche Bild 2).

Die Effizienz der Kühlung lässt sich mithilfe des „Coefficient Of Performance“ (COP – Leistungszahl) als Verhältnis von Nutzen (Kühlleistung) zu Aufwand (Antriebsleistung) quantifizieren. **Bild 3** zeigt die Auftragung des COP über der abgeführten Wärmeleistung. Es ergibt sich eine annähernd lineare Steigung der Messwertpunkte. Dies spiegelt wider, dass der Energieaufwand zur Kältebereitstellung nahezu unabhängig vom erbrachten Nutzen ist.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Betrieb der Förderpumpe: Da das hydraulische System über keine Regelorgane verfügt, ergibt sich ein konstanter Volumenstrom durch die Verbraucher und den Kälteerzeuger. Die Variation

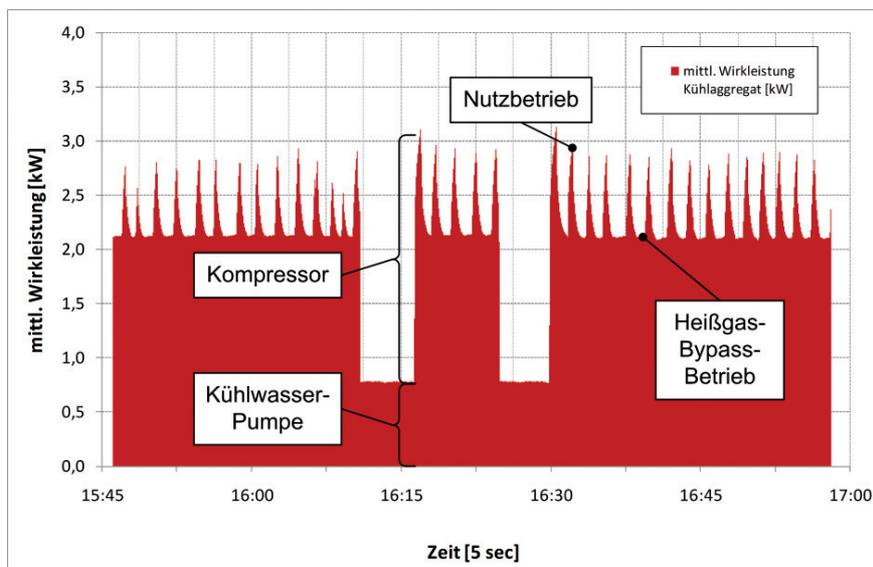


Bild 2. Zeitlicher Verlauf der Leistungsaufnahme des Kühl-Aggregats

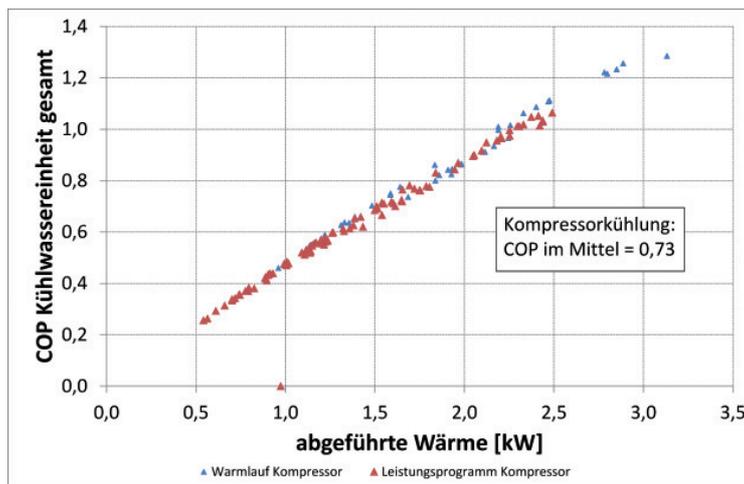


Bild 3. „Coefficient Of Performance“ (COP – Leistungszahl) der Kühlwassereinheit über der abgeführten Wärme

der geförderten Kälteleistung erfolgt ausschließlich über die Änderung der Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf. Diese liegt mit mittleren Werten bei 0,3 K (X-Achse) und 2,3 K (Spindel) zudem sehr niedrig, sodass sich unabhängig von der transportierten Kälteleistung eine konstant hohe Leistungsaufnahme der Pumpe ergibt.

Im Forschungsprojekt NCplus wird die Strategie verfolgt, gänzlich auf den Einsatz eines Kompressors zu verzichten. Stattdessen soll ein Lüfter die abzuführende Wärme ohne Temperaturhub direkt in die Umgebung abgeben [1]. Mit diesem Ansatz lassen sich bezogen auf das Kühlsystem gut zwei Drittel Energie einsparen. Erste Messungen mit einem Lüfterkühler der Firma Hydac bestätigen diesen Wert.

Dabei stellt sich ein Temperatur-Niveau im Kühlwasser-Vorlauf ein, das etwa 5 K über Umgebungstemperatur und damit höher als das bisherige liegt. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Zulässigkeit höherer Kühlwassertemperaturen in den maßgeblich zu kühlenden Komponenten, vor allem der Hauptspindel. Daher beschäftigt sich die Firma Kessler im Rahmen des Projekts mit der Konstruktion und Fertigung einer neuen Hauptspindel mit höherer Temperaturverträglichkeit. Zusätzlich werden die Druckverluste innerhalb der Spindel durch aufgeweitete Querschnitte sowie die Verlustleistung der Spindel durch weitere konstruktive Maßnahmen reduziert, sodass die Leistungsanforderungen an das Kühlsystem verringert werden.

3 Konzept für ein energieeffizientes Kühlsystem

Alternativ zum Konzept der freien Kühlung hat die perpendo GmbH untersucht, welches Einsparpotential unter Beibehaltung einer Kompressorkühlung besteht. Hierzu wurde ein Kühlkonzept anhand der folgenden Leitlinien entworfen und mithilfe einer auf realen Lastdaten basierenden Simulation evaluiert:

- Energieeffizienz: Das System soll Kühlwasser bedarfsgerecht bereitstellen, Dissipation durch Drossel- oder Bypassregelungen sollen so weit wie möglich vermieden werden. Dies gilt sowohl für den Verdichterbetrieb als auch für die hydraulische Leistung der Förderpumpe.

- Thermische Stabilität: Die Anforderungen an die Temperaturkonstanz der Kühlwasservorlauftemperatur bleiben erhalten.
- Wirtschaftlichkeit: Das Konzept soll möglichst kostengünstig umzusetzen sein, das heißt aus Standardkomponenten aufbaubar und im technischen Aufwand begrenzt sein. Dies schließt zum Beispiel die Ausstattung jedes einzelnen Verbraucherkreislaufs mit einer eigenen drehzahlgeregelten Pumpe aus.
- Skalierbarkeit: Je nach Art und Ausstattung der Werkzeugmaschine sind unterschiedlich viele Komponenten mit verschiedenen Lastprofilen zu versorgen. Eine Erweiterung des Systems um zusätzliche Verbraucher soll ähnlich eines Baukastensystems einfach möglich sein.

3.1 Kältemittel-Verdichter im Aussetzbetrieb

Die Anzahl der Schaltvorgänge eines Kompressorkühlers ist konstruktionsbedingt auf rund 15 Betätigungen pro Stunde begrenzt, weswegen in der DMC80H eine Heißgas-Bypass-Regelung einen durchgehenden Betrieb und eine Anpassung der Nutzkühlleistung an den Bedarf ermöglicht. Als Alternative sieht das hier vorgestellte Konzept die Verwendung eines Pufferspeichers vor. Dieser gestattet die Entkopplung von Bedarf und Erzeugung und erlaubt so ausreichend lange Taktzeiten. In **Bild 4** ist das Funktionsprinzip dieses Ansatzes dargestellt. Der Verdichter arbeitet in Abhängigkeit von dem Zustand des Speichers im Aussetzbetrieb. Sobald nicht mehr ausreichend kaltes Kühlwasser zur Verfügung steht, gibt ein Temperaturfühler im unteren Bereich ein entsprechendes Signal an den Verdichter. Dieser läuft nun solange, bis ein Fühler im oberen Bereich registriert, dass der Speicher vollständig geladen ist. Mit einem Fassungsvermögen von etwa 100 Litern kann auch bei ungünstigem Verlauf des Kühlbedarfs ein zu häufiges An- und Ausschalten des Kompressors vermieden werden.

Um die geforderte Temperaturstabilität zu erfüllen und die geförderten Wassermengen möglichst gering zu halten, ist ein Schichtenspeicher einzusetzen. Voraussetzung für eine stabile Temperaturschichtung im Speicher sind zunächst

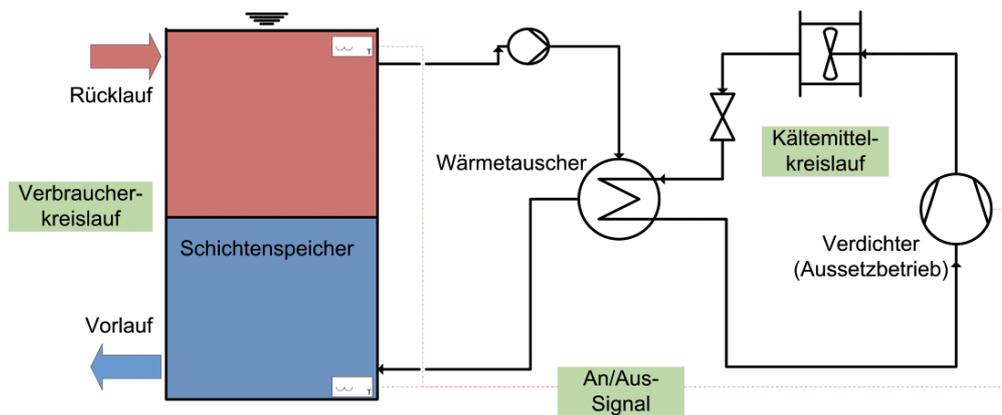


Bild 4. Funktionsprinzip des Kompressors mit Schichtenspeicher im Aussetzbetrieb

konstante Temperaturverhältnisse in den eintretenden Kühlwasserströmen (Erzeugervorlauf, Verbraucher-Rücklauf). Zusätzlich muss die Einströmung in den Speicher derart gestaltet werden, dass der einströmende Impuls nicht die Temperaturschichtung zerstört. Zur Abschätzung dieses Effekts eignet sich die Richardson-Zahl [3]. Sie setzt die Auftriebskräfte der Temperaturschichtung ins Verhältnis zu den Trägheitskräften der Einströmung und sollte für stabile Verhältnisse möglichst größer als eins sein. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen, beispielsweise einen radialen Diffusor oder ein über beziehungsweise unter dem Einlaufbereich horizontal eingespanntes permeables Textil, lässt sich diese Forderung bei richtiger Dimensionierung der geometrischen Verhältnisse erfüllen.

Im Vergleich zum Status-quo muss bei diesem Konzept eine zusätzliche Ladepumpe vorgesehen werden, die das Kühlwasser vom oberen Bereich des Speichers über den Verdampfer der Kältemaschine in den unten vorgesehenen Einlauf fördert. Dieser Verbraucher spielt jedoch mit einer mittleren Leistungsaufnahme von etwa 20 W nur eine untergeordnete Rolle. Der Betriebszeitanteil des Kältemittelverdichters lässt sich durch diese Maßnahme je nach Auslegung auf etwa 25 % reduzieren, wenn der Referenzprozess der Werkzeugmaschine zugrunde gelegt wird. In Bezug auf die Leistungsaufnahme des Verdichters ist mit einer mittleren Einsparung von etwa 1000 W zu rechnen – das entspricht etwa 60 %.

3.2 Regelung der Förderpumpe

Auch bei der Konzeption des hydraulischen Systems wurde der Ansatz verfolgt, die Förderleistung dem tatsächlichen Bedarf mit möglichst einfachen Mitteln anzupassen und so den Energieeinsatz und den Wärmeeintrag infolge von vermeidbarer Dissipation zu minimieren. Zunächst gilt es dazu, den umgewälzten Wassermassenstrom möglichst weit abzusenken. Begrenzend ist hier die mit der Absenkung des Massenstroms ansteigende Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf des Kühlwassersystems, wobei sich die maximal zulässige Spreizung aus der gewählten Vorlauftemperatur und der – abhängig von den zu kühlenden Komponenten – maximal zulässigen Verbraucher-Austrittstemperatur ergibt. In gängigen Kaltwassersystemen wird eine Spreizung von 6 K als sinnvoll

angesehen, für die hier vorgestellten Ergebnisse wurden konservativ 3 K vorausgesetzt.

Sobald die angestrebte Temperaturspreizung die maximal zulässige Temperaturschwankung von circa 1 K im System übersteigt, ist diese zur Gewährleistung der Temperaturstabilität durch regelungstechnische Nachführung des Wassermassenstroms für jeden angeschlossenen Verbraucher unabhängig von der aktuell abgenommenen Kälteleistung konstant zu halten. Diese Nachführung erfolgt in dem hier vorgestellten Konzept durch motorische Stellventile im Vorlauf der einzelnen Verbraucher und der jeweiligen Kühlwasser-austrittstemperatur als Regelgröße. Um die hydraulische Leistung der zentralen Förderpumpe an den so eingeregelteten Volumenstrom anzupassen, wird die Pumpendrehzahl in einem übergeordneten Regelkreis nachgeführt. Als Regelgröße dient hier das aktuelle Minimum der Druckverluste über die Regelventile der Verbraucher: Der von der Pumpe gelieferte Vordruck wird so eingestellt, dass der Verbraucher mit dem größten Druckverlust noch ausreichend versorgt wird, also der Druckverlust über sein Regelventil einen vorgegebenen Minimalwert erreicht.

Das beschriebene Konzept ist exemplarisch für die zwei Verbraucher „Hauptspindel“ und „X-Achse“ der DMC80H in **Bild 5** dargestellt. Prinzipiell kann die Strategie jedoch bei beliebig vielen, heterogenen Verbrauchern angewandt werden, etwa bei größeren Werkzeugmaschinen wie der zweiten im Projekt untersuchten Maschine „DMU340P“. Voraussetzung hierfür ist, dass sämtliche Verbraucher gleiche Anforderungen an das Temperaturniveau stellen und die Druckverluste im Nennbetrieb möglichst in der gleichen Größenordnung liegen.

Um die Auswirkungen dieser Maßnahme auf den maßgeblichen Parameter „Rücklaufftemperatur“ zu bewerten und mögliche Energieeinsparungen zu quantifizieren, wurde das dargestellte Konzept mittels der Modellierungssprache „Modelica“ in ein thermisches Modell des Kühlsystems überführt. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, wurden für die Pumpe sowie die Stellventile reale Hersteller-Kennlinien hinterlegt, während das dynamische Verhalten der Mess-Sensoren durch PT1-Glieder nachgebildet wurde.

Bild 6 zeigt Simulationsergebnisse des thermischen Modells für den Referenzprozess der Werkzeugmaschine. Der Verlauf des gemessenen Kühlbedarfs der beiden Verbraucher (oben) dient als Eingangsgröße in das Modell, zudem sind die

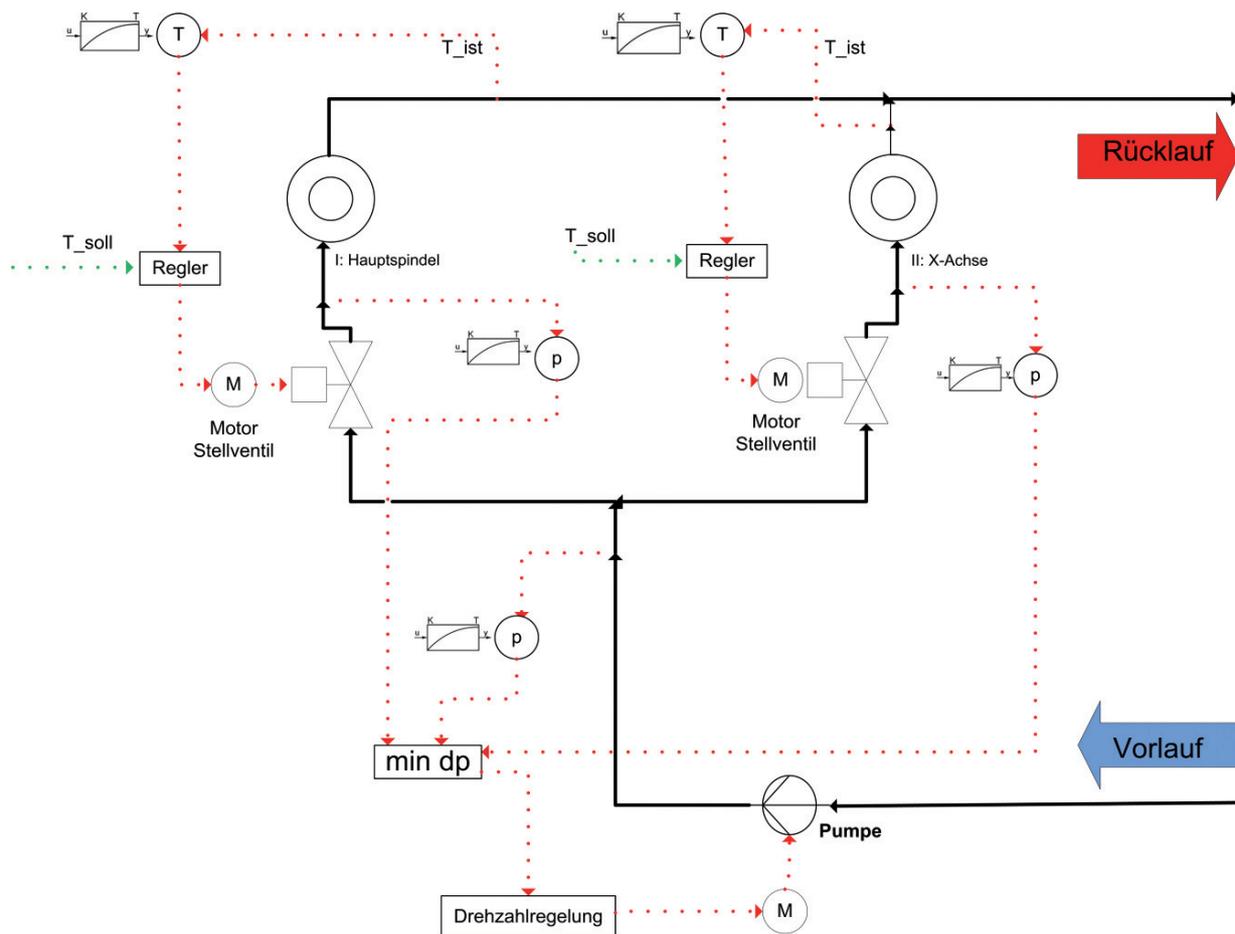


Bild 5. Darstellung des Regelungskonzepts im Verbraucherkreislauf

resultierenden Drücke vor und nach den Ventilen sowie die sich einstellende Leistungsaufnahme der Pumpe und der beiden Stellventile dargestellt (Mitte). Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem bei verhältnismäßig geringem Kühlbedarf (blaue Kreise) eine erhebliche Vordruckreduzierung realisierbar ist. Über den Prozess ergibt sich eine gemittelte Leistungsaufnahme von etwa 160 W (unten); das entspricht einer Energieeinsparung von 77% gegenüber dem unregulierten System (Status-quo: 720 W). Diese Einsparung übersteigt die durch eine klassische Konstantdruckregelung (Leistungsaufnahme: 590 W) erreichbare deutlich.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zur Effizienzbewertung der beiden vermessenen Werkzeugmaschinen bestätigen, dass vor allem im Bereich der Neben-Aggregate bedeutende Potentiale zur Energieeinsparung liegen. Der Optimierung des Kühlsystems kommt dabei die größte Bedeutung zu. Der überwiegende Teil der identifizierten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung zielt mit vorwiegend regelungstechnischen Verbesserungen auf die bedarfsgerechte Versorgung der aktiv gekühlten Maschinenkomponenten ab. Die **Tabelle** zeigt die möglichen Einsparungen durch die erläuterten Maßnahmen bezogen auf den Referenzprozess der Maschine. →

Kontakt Projektträger

Dipl.-Ing. Michael Petzold
 Projektträger Karlsruhe
 Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT)
 Außenstelle Dresden
 Hallwachsstr. 3, D-01069 Dresden
 Tel. +49 (0)351/463-314 69, Fax +49 (0)351/463-314 44
 E-Mail: michael.petzold@kit.edu
 Internet: www.produktionsforschung.de

Tabelle. Einsparpotentiale im Kühlsystem

Verbraucher	Status-Quo	Neue Kühlstrategie
Verdichter	1680 W	650 W
Förderpumpe	720 W	157 W
Antrieb Stellventile	-	7 W
Ladepumpe	-	20 W
Σ P	2400 W	834 W

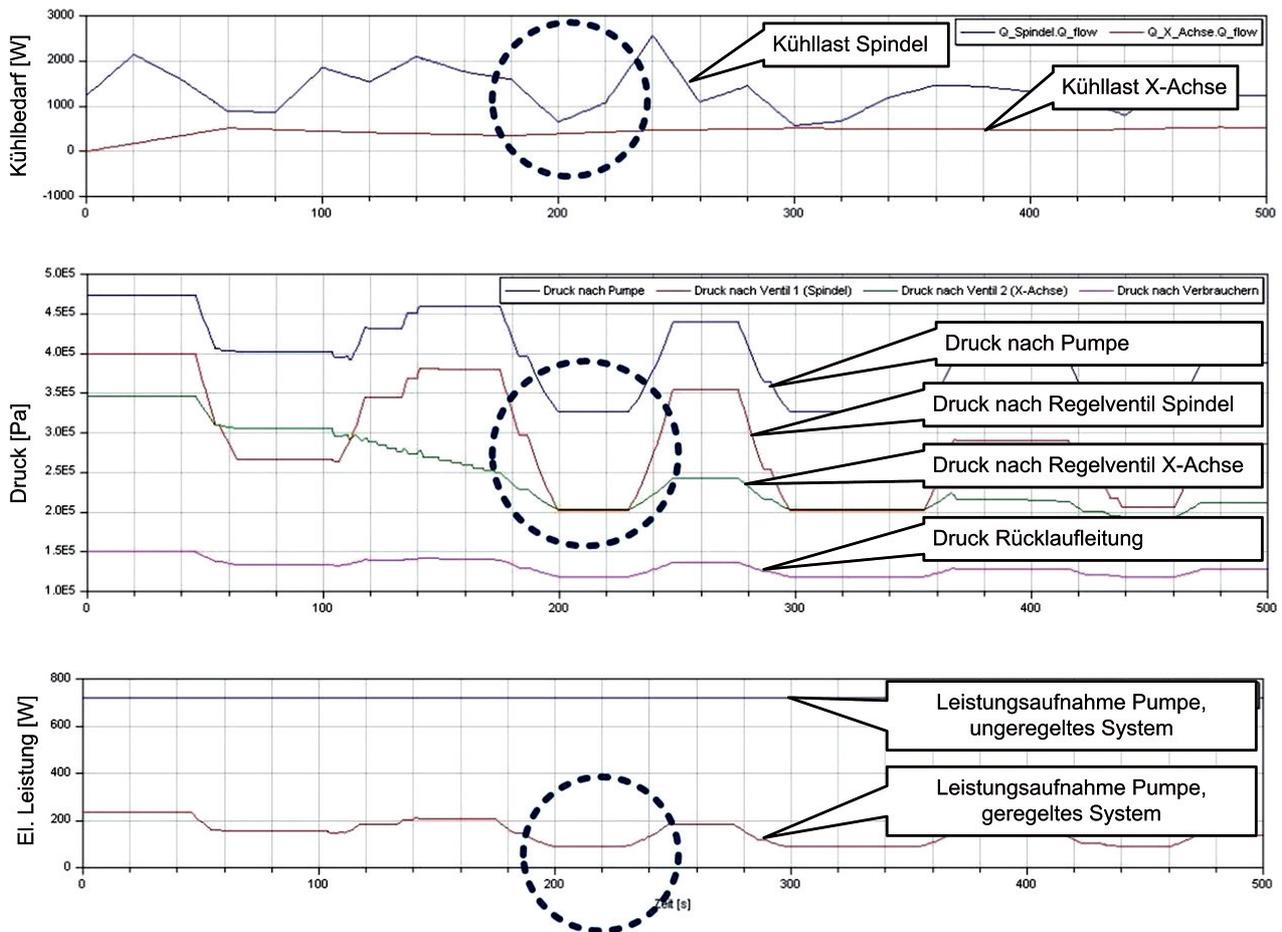


Bild 6. Simulationsergebnisse

Insgesamt lässt sich durch die Maßnahmen eine Energieeinsparung von etwa 65% (1,5 kW im Betrieb, 6500 kWh/a bei zehn Schichten pro Woche) bezogen auf den Energieverbrauch des jetzigen Kühlsystems erzielen. Eine erste Abschätzung der Mehrkosten für Speicher, drehzahlregelte Pumpe und Regelungseinrichtungen lässt unter den Randbedingungen eines Zweischichtbetriebs eine Amortisationsdauer unterhalb von drei Jahren erwarten.

Eine Strategie, die gänzlich auf den Einsatz eines Kältemittelverdichters verzichtet, erreicht sogar Einsparungen von etwa 70%, ohne eine Regelung der Förderpumpe vorzusehen. Sie stellt jedoch aufgrund der umgebungsgeführten Vorlauftemperatur höhere Anforderungen an die Verbraucher. □

Literatur

- [1] Denkena, B.; Möhring, H.-C.; Hackelöer, F.; Hülsemeyer, L.; Dahlmann, D.; Augenstein, E.; Nelles, J.; Grigoleit, A.: Effiziente Fluidtechnik für Werkzeugmaschinen. *wt Werkstattstechnik online* 101 (2011) Nr. 5, S. 347–352. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag
- [2] Nelles, J.; Wurm, A.; Augenstein, E.: Effiziente Werkzeugmaschine – Mehr Effizienz und weniger Abwärme in der Maschinenhalle. *Kälte Klima Aktuell* (2011), Sonderausgabe Großkältetechnik 2011, S. 42–45
- [3] Huhn, R.: Beitrag zur thermodynamischen Analyse und Bewertung von Wasserwärmespeichern in Energieumwandlungsketten. Dissertation, Technische Universität Dresden, 2006