

Energetisch-wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes drehzahl geregelter Antriebe in Werkzeugmaschinen

(Evaluation of the energy- and cost-effectiveness of the application of speed-controlled drives in machine tools)

Götze, U.¹; Lindner, R.¹; Kolesnikov, A.²; Paetzold, J.²

¹ TU Chemnitz, Professur Unternehmensrechnung und Controlling

² TU Chemnitz, Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

Abstract

Seit 2011 gelten die Ökodesign-Anforderungen an die Gestaltung von Elektromotoren: Diese werden auch in Werkzeugmaschinen eingesetzt und wirken sich auf deren Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit aus. Vor diesem Hintergrund wird im vorliegenden Aufsatz eine Methodik zur integrierten energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Werkzeugmaschinen bzw. Gestaltungsmaßnahmen an diesen vorgestellt. Diese wird dann auf den Einsatz drehzahl geregelter Pumpen angewendet, um einerseits einen Beitrag zu ihrer Validierung zu leisten und andererseits zu untersuchen, welche energetischen und wirtschaftlichen Wirkungen die Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben im Beispiel einer Werkzeugmaschine hat.

The eco-design-requirements regarding the design of electric motors are in force since 2011: They are also used for the design of machine tool components and, therewith, affect the machine tools' energy- and cost-effectiveness. Against this background, this paper presents a methodology for an integrated energy and economic evaluation of machine tools and introduces concrete design measures. Both are applied on the example of speed-controlled pumps. Therewith, on the one hand, the authors want to contribute to the evaluation of these pumps. On the other hand, they will exemplarily analyze the energy-related and economic effects of the implementation of the obligatory eco-design-requirements of a machine tool.

Keywords:

Ökodesign-Richtlinie, drehzahl geregelte Pumpen, energetisch-wirtschaftliche Bewertung, Werkzeugmaschine

eco-design directive, speed-controlled pumps, energetic and economic evaluation, machine tool

R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2013.

URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

1 Problemstellung und Zielsetzung

Im Rahmen der Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EG und der 2009 erlassenen Durchführungsverordnung Nr. 640 hat die EU-Kommission produktbezogene Anforderungen an Elektromotoren formuliert, um die Modernisierung des Bestandes an ineffizienten (und meist unregulierten) Motoren zu beschleunigen und damit jährlich allein in Deutschland ca. 38 TWh Strom einzusparen [1]. In Bezug auf das Inverkehrbringen und die Inbetriebnahme von Elektromotoren sind die Hersteller daraus resultierend seit Mitte 2011 verpflichtet, mindestens die Energieeffizienzklasse IE2 einzuhalten. Ab 2015 müssen Motoren mit bestimmten Nennleistungen und ab 2017 alle Motoren die Energieeffizienzklasse IE3 oder eine höhere Klasse erreichen oder mit elektronischen Leistungswandlern ausgestattet sein.

Diese gesetzlichen Vorgaben können die in Werkzeugmaschinen (WZM) verbauten Motoren betreffen. Aber auch für die von der Verordnung ausgenommenen Motoren lohnt sich u. U. eine entsprechende Energieeffizienzmaßnahme. So möglicherweise bei den Hilfsantriebssystemen, die zahlreiche Pumpen, bspw. der Hydraulik oder des Kühlschmierstoffsystems, antreiben. Der Einsatz elektronischer Leistungswandler in den Hilfsantriebssystemen soll u. a. zu einem geringeren Energieverbrauch in der Betriebsphase und zur Reduzierung von Leistungsverlusten führen [2]. In dem Beitrag wird die Erreichung dieser Zielsetzung mittels einer energetischen Bewertung für ein spezielles Anwendungsbeispiel geprüft. Darüber hinaus wird der Frage nachgegangen, ob der Einsatz geregelter Elektromotoren auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die während der Nutzung von WZM anfallenden Energiekosten durch entsprechende Energieverbrauchsminderungen vergleichsweise geringer ausfallen (wobei das Ausmaß der Einsparung auch durch die tendenziell steigenden Energiepreise beeinflusst wird), dem jedoch höhere Kosten bei der Anschaffung neuer Maschinen gegenüber stehen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt zunächst eine Methodik zur integrierten energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von WZM bzw. von Gestaltungsmaßnahmen an diesen, wie der hier diskutierten. Das im Mittelpunkt der Methodik stehende (generische) Vorgehensmodell wird dann sowohl zur energetischen Bewertung als auch zur darauffolgenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung des Einsatzes drehzahl geregelter Motoren innerhalb der Hydraulik angewendet. Neben der Validierung der Methodik soll das konkrete Potential dieses Antriebs bei einer vorhandenen WZM vergleichend zur konventionellen, unregulierten Variante abgeschätzt werden. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung der hierbei gewonnenen Erkenntnisse.

2 Methodik zur integrierten energetischen und wirtschaftlichen Bewertung von Werkzeugmaschinen

Die hier vorgeschlagene Methodik ist durch die Kombination verschiedener technischer und wirtschaftlicher Bewertungsbausteine charakterisiert (siehe Bild 1). Die energetische Bewertung basiert auf der Messung sowie der Modellierung und Simulation von Energieverbrauchsdaten, wobei beide insofern zusammenspielen, als Messergebnisse der Identifikation von zu modellierenden Verbrauchsschwerpunkten und der Modellvalidierung dienen und im Gegenzug mittels Simulation nur aufwändig messbare oder zukünftige Daten generiert werden können. Die mit diesen Methoden ermittelten realen und erwarteten Energieverbräuche gehen in die (auch energieeffizienzbezogene) wirtschaftliche Bewertung von WZM (-Komponenten) und deren alternativen Gestaltungsmöglichkeiten ein (aus der wiederum Hinweise für Effizienzsteigerungen hervorgehen können). Die energetischen wie wirtschaftlichen Bewertungsergebnisse sind in allen Phasen des Problemlösungsprozesses zur energieeffizienzbezogenen Gestaltung technischer Systeme nutzbar.

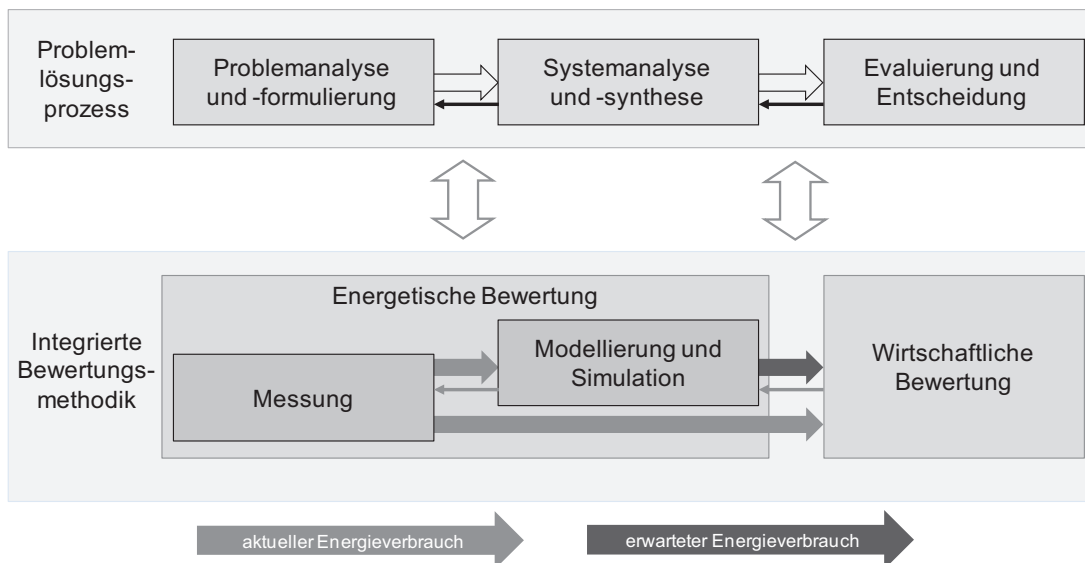


Bild 1: Integrierte energetische und wirtschaftliche Bewertungsmethodik (übersetzt über. von [3])

Die energetisch-wirtschaftliche Bewertung von WZM ist eine komplexe und anspruchsvolle Aufgabe, da zahlreiche Gestaltungsvarianten und Einflussfaktoren sowie lange Zeiträume zu beachten sind. Um nun die Bewertung in einer strukturierten und konsistenten Form durchzuführen, ist die Verwendung eines generischen Vorgehensmodells (siehe Bild 2) zu empfehlen. Dieses zur energetischen, wirtschaftlichen und integrierten Bewertung einsetzbare Modell besteht aus zwei Betrachtungsebenen: der Gesamtmodellebene und der Submodellebene. Auf der

übergeordneten Gesamtmodellebene wird die WZM als Ganzes in Bezug auf technische/energetische und/oder wirtschaftliche Kriterien bewertet; die untergeordnete Submodellebene dient der Lösung von Partialproblemen der energieeffizienzbezogenen Gestaltung von WZM wie der hier im Mittelpunkt stehenden Auswahl effizienter Hydraulikantriebe. Die Erkenntnisse aus der Submodellebene stellen zum einen eine Grundlage für die Bewertung spezifischer (alternativer Ausprägungen von) Komponenten (oder ggf. Prozesse) dar und fließen zum anderen in die Gesamtmodellebene ein.

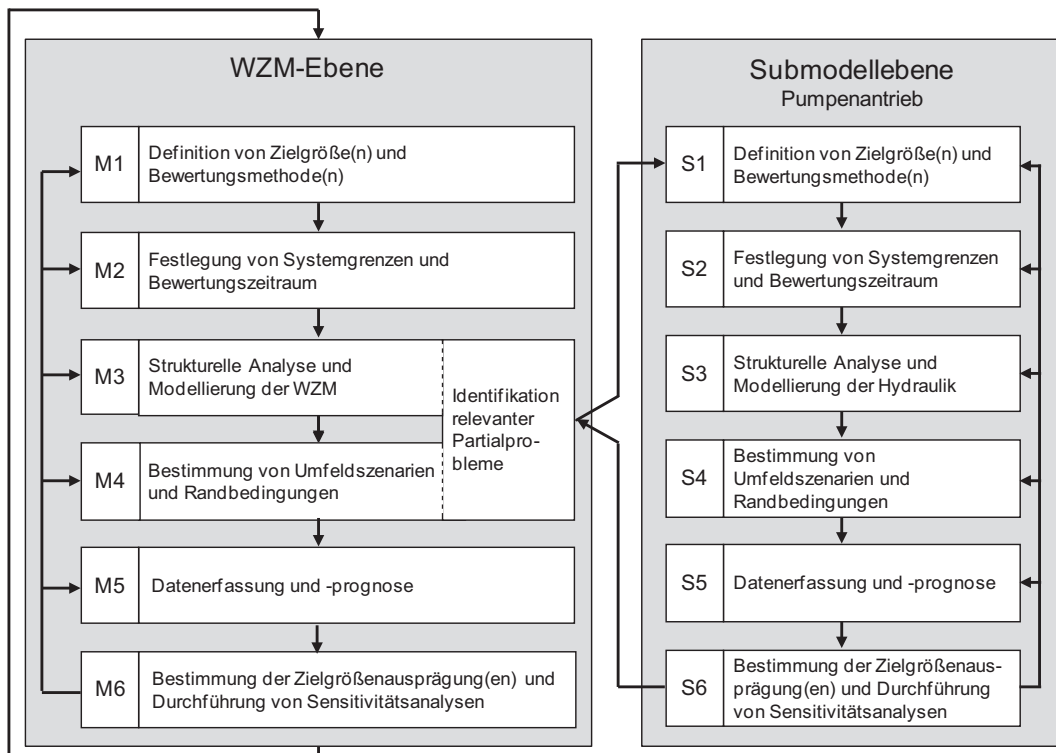


Bild 2: Vorgehensmodell zur Bewertung von WZM (übersetzt übern. und spezifiziert von [3])

Die Bewertung umfasst auf beiden Ebenen des Vorgehensmodells sechs Schritte. Nach der Definition von Zielgröße(n) und Bewertungsmethode(n) (Schritt 1) werden Systemgrenzen sowie Bewertungszeiträume (Schritt 2) festgelegt. Danach können die Modellierung und die Analyse der WZM (Schritt 3) sowie die Untersuchung relevanter Umweltbedingungen erfolgen (Schritt 4). Auf WZM-Ebene wird dies in der Regel zu einer Identifikation relevanter Partialprobleme und einem Wechsel auf die Submodellebene führen. Im 5. Schritt sind weitere relevante Daten wie die Energieverbräuche bzw. -kosten zu erfassen und zu prognostizieren, bevor im letzten Schritt die Ausprägung(en) der Zielgrößen bestimmt und im Bedarfsfall Sensitivitätsanalysen zur Einbeziehung von Unsicherheiten durchgeführt werden.

Nachfolgend sind nun die einzelnen Schritte des Vorgehensmodells zunächst für die energetische und daran anknüpfend auch für die wirtschaftliche Analyse und Bewertung ausführlicher am Beispiel der gewählten Gestaltungsmaßnahme dargestellt.

3 Energetische Bewertung

Im Mittelpunkt der Betrachtung steht das Hydrauliksystem eines Bearbeitungszentrums (BAZ). In Anbetracht der eingangs genannten, gesetzlichen Vorgaben sowie der Energie- (und Kosten-) Effizienzüberlegungen soll beispielhaft ein drehzahlvariabler Antrieb des Hydraulikaggregats im Fokus stehen. Die Wahl fiel auf die Pumpen-Motorgruppe, da das Einsparpotential des Energieverbrauchs der Hydraulik gemessen am Gesamtsystem bedeutend ist [4]. Die Ursache hierfür ist in der kontinuierlichen Aktivität der Drehzahlregelung der Pumpen-Motorgruppe in verschiedenen Betriebszuständen und der damit verbundenen Anpassung des Volumenstroms der Pumpe zu finden.

Schritt 1: Festlegung von Zielgröße(n) und Bewertungsmethode(n)

Im Fokus steht die Einsparung des Verbrauchs elektrischer Energie, die durch den Einsatz drehzahlvariabler Hydraulikantriebe erzielt wird. Im Rahmen der Energiebilanzierung sind mit Hilfe von Analysen zunächst die Energieflüsse der Hydraulik zu bestimmen. Anschließend wird der Energieverbrauch mittels Leistungs- und Energieprofilen des drehzahl geregelten und des konventionellen Hydraulikantriebs ermittelt. Da die Einsparungen durch Veränderungen im Lastprofil und durch die Reduzierung der entnommenen Blindleistung im Vergleich zu den Ersparnissen durch die Senkung der Wirkleistung wesentlich geringer sind, soll auf eine Bewertung dieses Aspekts im Rahmen dieses Beitrags verzichtet werden.

Schritt 2: Festlegung von Systemgrenzen und Bewertungszeitraum

Das Hydraulikaggregat als Teilsystem der WZM bezieht die benötigte Energie über die Infrastruktur der Werkhalle, in welche auch die Energieverluste, v. a. in Form von Abwärme, abgegeben werden. Die Systemgrenzen für die zu untersuchende Baugruppe sind demnach der Bezug elektrischer Energie über den Hauptanschluss sowie Druck und Volumenstrom der Hydraulik. Der durchschnittliche Lebenszyklus einer CNC-gesteuerten WZM umfasst gegenwärtig ca. 10 Jahre [5]. Dementsprechend sollte diese Lebensdauer als Bewertungszeitraum zugrunde gelegt werden.

Schritt 3: Strukturelle Analyse und Modellierung des Hydraulikaggregats

In diesem Schritt werden Teilsysteme des Hydraulikaggregats abgegrenzt und systematisiert. Zur Verdeutlichung des Unterschieds zwischen drehzahlgeregelten und konventionellen Hydraulikantrieben soll Bild 3 dienen, das die Grundprinzipien beider Antriebsvarianten zeigt.

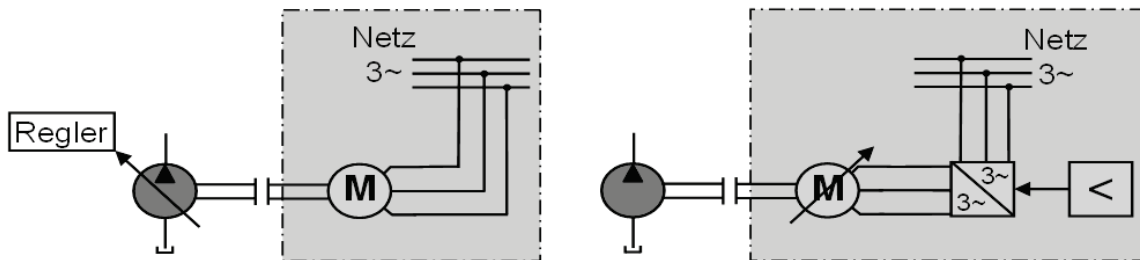


Bild 3: Grundprinzipien eines konventionellen (links) und eines drehzahlgeregelten (rechts) Hydraulikantriebs

Im konventionellen Hydrauliksystem (links) treibt ein direkt aus dem Netz gespeister Asynchronmotor mit nahezu konstanter Drehzahl die Flügelzellenpumpe an. Die Druck- und Volumenstromregelung erfolgt dabei über Druckreduzier- und Wegeventile sowie Bypassleitungen zum Tank. Beim drehzahlgeregelten Hydrauliksystem (rechts) wird im Unterschied dazu die Pumpe durch einen drehzahlgeregelten Motor mit Frequenzumrichter (siehe auch Bild 4) betrieben.

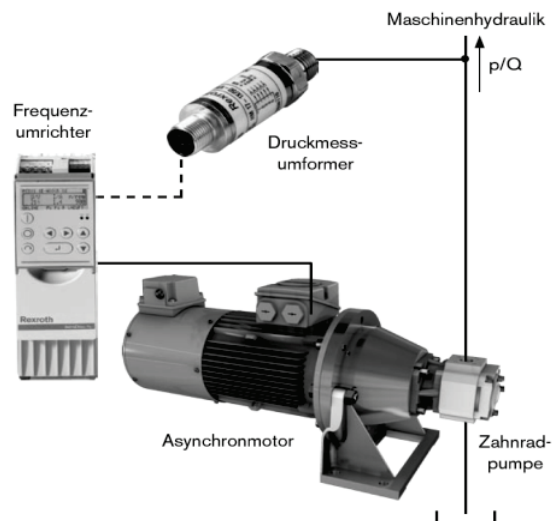


Bild 4: Systemaufbau des drehzahlgeregelten Hydraulikantriebs [6]

Der Frequenzumrichter hat hier zwei Funktionen: zum einen die Gewährleistung der Energieversorgung und zum anderen die Regelung des hydraulischen Drucks, der durch den Druckmessumformer erfasst wird. Zur Realisierung des letztgenannten gibt die Maschinensteuerung den Soll-Wert des Drucks im Volumenstrom der Hy-

draulikflüssigkeit vor und regelt diesen über die Drehzahlveränderungen des Motors. Damit stellt sich ein optimaler Wirkungsgrad des Motors ein.

Schritt 4: Bestimmung von Umfeldszenarien und Randbedingungen

Im vierten Schritt sind die Technologie, die Betriebsstunden sowie die Reihenfolge und Dauer des Betriebs des Hydraulikaggregats festzulegen. Für die hier untersuchte WZM wird ein 3-Schicht-Betrieb ohne Abschaltung der Maschine angenommen. Daraus folgen jährlich 6.000 Betriebsstunden.

Schritt 5: Erfassung/Prognose von Daten

Die Datenerfassung umfasst die Ermittlung und Berechnung der Energieverbräuche für konventionelle und drehzahl geregelte Hydraulikantriebe. Dazu wurden sowohl Leistungsmessungen an der Hydraulik des BAZ vorgenommen als auch vergleichbare Simulationen basierend auf Ergebnissen aus [6] durchgeführt (siehe Bild 5).

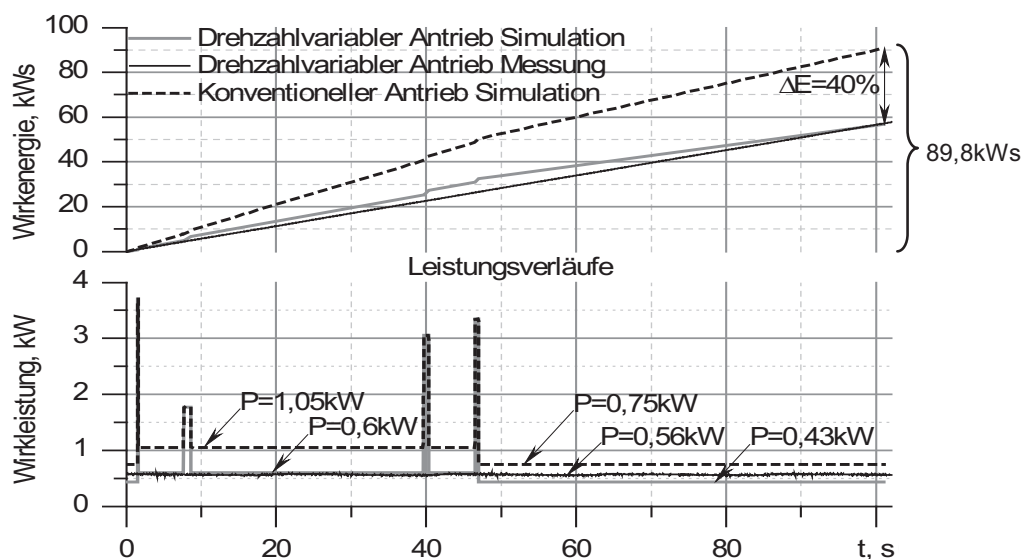


Bild 5: Leistungs- und Energieprofile des Hydraulikantriebs

Die Leistungsverläufe wie in Bild 5 lassen sich generell nach der Höhe des Leistungsverbrauchs unterscheiden. Ein erhöhter Leistungsverbrauch kann durch die steigende Belastung der Hydraulik beim Spannen von Werkzeugen (kurzzeitig) und Werkstücken entstehen. Die niedrigere Belastung bei der Wartezeit (ohne Standby) führt hingegen zu einem niedrigeren Leistungsverbrauch. Im hier betrachteten Fall wurde bei der Simulation eine zeitliche Auslastung der Hydraulik von 45 % mit höherem Leistungsverbrauch und 55 % mit niedrigerem Leistungsverbrauch angenommen [7].

Die Messungen von Wirkleistung bzw. Wirkenergie bestätigen für das untersuchte BAZ zum einen die Vergleichbarkeit mit den sich aus der Simulation ergebenden Energieverbräuchen pro fiktivem Zyklus¹. Zum anderen ist aber anhand der Messergebnisse erkennbar, dass die Auslastung des drehzahlvariablen Antriebs in den untersuchten Betriebszuständen hinsichtlich des hier betrachteten Zyklus nur bedingt bedeutend für die energetische Bewertung des BAZ ist, da sich messtechnisch kaum Unterschiede im Energieverbrauch nachweisen lassen.

Schritt 6: Bestimmung der Zielgrößenausprägung

Im letzten Schritt werden schließlich die Zielgrößenausprägung (hier der Energieverbrauch) bestimmt sowie Plausibilitätsprüfungen durchgeführt. Aus Bild 5 folgt, dass die Einsparung 35,92 kW pro fiktivem Zyklus (entspricht 40 % für das hier untersuchte BAZ) beträgt und damit eine energetische Vorteilhaftigkeit vorliegt.

Über das Ergebnis hinaus ist auf weitere ökologische Aspekte hinzuweisen, die jedoch außerhalb der betrachteten Systemgrenze liegen und nicht Gegenstand der energetischen Bewertung waren. Dazu gehören die Verringerung der Geräuschemissionen um bis zu 20 dB und der damit verbundene Wegfall von Sekundärmaßnahmen zur Geräuschkürzung [8]. Ebenso kann in vielen Fällen auf eine Kühlung verzichtet werden, da sich die Hydraulikflüssigkeit durch die geringere Energieaufnahme weniger stark erwärmt, was wiederum kompaktere Bauformen zulässt [8]. Durch den geringeren Wärmeeintrag steigt zudem die Lebensdauer des Hydraulikmediums [9].

Aufbauend auf den Erkenntnissen sollen nachfolgend wirtschaftliche Wirkungen des Einsatzes geregelter Motoren analysiert werden.

4 Wirtschaftliche Bewertung

Die Energieeffizienz stellt nur eines der bei der Gestaltung von WZM verfolgten Ziele dar. Daneben sind insbesondere die Funktionalität und die Kosten relevant. So werden sich letztlich energetisch verbesserte WZM-Komponenten nur dann durchsetzen, wenn die Kosten bei gleicher Funktionalität geringer oder zumindest nicht höher sind als die von Vergleichsalternativen und damit eine Vorteilhaftigkeit aus wirtschaftlicher Sicht vorliegt.

Da unterschiedlich energieeffiziente WZM oftmals unterschiedlich hohe Kosten in verschiedenen Lebenszyklusphasen verursachen und auch Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz gegenläufige Kosteneffekte bewirken können, wird

¹ Ein fiktiver Zyklus entspricht dem theoretischen Zeitraum, in dem die Hydraulik einmal die Betriebszustände mit höherer und niedrigerer Belastung durchläuft. Das sind gemäß Bild 5 100 s.

eine Fokussierung allein auf die Anfangs- bzw. Anschaffungskosten oft zur Wahl einer langfristig unwirtschaftlichen Alternative führen. Um nun Entscheidungen über die Gestaltung von WZM in wirtschaftlicher Hinsicht vorzubereiten, bietet es sich an, Lebenszyklusmodelle zu bilden und auszuwerten. Mit solchen Lebenszyklusrechnungen können alle über den Lebenszyklus der WZM anfallenden Kosten (und Erlöse) oder Zahlungen strukturiert erfasst und transparent dargestellt, Wechselwirkungen zwischen der Höhe dieser monetären Größen in verschiedenen Phasen identifiziert und analysiert sowie Handlungsalternativen (einschließlich Verbesserungsmaßnahmen) bewertet werden. In den Rechnungen sollten angesichts der steigenden Relevanz energetischer Aspekte auch die Energiekosten mit hoher Transparenz erfasst und analysiert werden (zur Berücksichtigung von Energiekosten in Lebenszykluskostenrechnungen von WZM siehe [10]). Ausgehend vom vorgestellten Vorgehensmodell sollen nun Vorschläge für die Ausgestaltung einzelner Schritte bei der wirtschaftlichen Bewertung unterbreitet und die betrachtete Gestaltungsmaßnahme bewertet werden.

Schritt 1: Festlegung von Zielgröße(n) und Bewertungsmethode(n)

Hier wird, wie bereits angedeutet, von einer Konzentration auf die monetäre Zielsetzung Lebenszykluskosten (unter den Nebenbedingungen einer festgelegten Funktionalität, ökologischen Verträglichkeit etc.) ausgegangen, wobei den Energiekosten angesichts der untersuchten Alternativen besondere Relevanz zukommt. Als relevante Energiekosten werden hier allein die Bezugskosten für elektrische Energie angesehen, da annahmegemäß die Kosten der Energiewandlung, der betrieblichen Energieverteilnetze, der Energieträgerlagerung, der Entsorgung energiebezogener Abfälle und der energiebezogenen lenkenden und administrativen Aktivitäten nicht durch die Gestaltungsmaßnahme verändert werden.

Angesichts des tendenziell langen Wirkungszeitraums von WZM und auch der zur Wahl stehenden Gestaltungsalternative wird für die Durchführung einer dynamischen Investitionsrechnung plädiert, da nur mit dieser langfristige Wirkungen, Veränderungen von Größen im Zeitablauf sowie Zinseszinsseffekte adäquat einbeziehbar sind. Konkret bietet es sich an, die Kapitalwertmethode zu nutzen und damit die Zielgröße Kapitalwert heranzuziehen (vgl. [11]). Außerdem sollten die Berechnungen auf Basis von Auszahlungen anstelle der eher für kurzfristige Rechnungen geeigneten Kosten erfolgen; dennoch wird der Einfachheit halber und in Anlehnung an die Verwendung in der Unternehmenspraxis weiter von Lebenszykluskosten gesprochen.

Schritte 2 bis 4

Die Schritte 2 bis 4 erfolgen analog zur energetischen Bewertung. Als Bewertungszeitraum wird der Lebenszyklus von 10 Jahren zugrunde gelegt. Ergänzend sind

insbesondere (weitere) wirtschaftlich relevante Größen in den Umfeldszenarien sowie den Randbedingungen zu berücksichtigen.

Schritt 5: Erfassung/Prognose von Daten

Allgemein kann die Erfassung und Prognose von Daten aufwändige Analyse- und Prognoseaktivitäten bezüglich einer Vielzahl von Größen umfassen. Hier sind die Anschaffungsauszahlung der Gestaltungsmaßnahme zu ermitteln sowie Veränderungen der Energiekosten zu untersuchen. Andere Kostenkategorien der Nutzungsphase von WZM wie Instandhaltungs- oder Raumkosten werden sich erwartungsgemäß nicht wesentlich verändern – sie sollen daher im Folgenden vereinfachend als nicht relevant erachtet und nicht weiter betrachtet werden; gleiches gilt für Liquidationskosten/-erlöse.

Für den Einsatz drehzahl geregelter Elektromotoren bedarf es – wie oben beschrieben – eines Frequenzumrichters und weiterer Komponenten. Darüber hinaus sind bestimmte Anforderungen bezüglich der Steuerung zur Anpassung des Druck-Ist-Wertes zu beachten. Demgegenüber entfallen Druckregelventile und relevante mechanische Bauteile. Im Falle der Neuanschaffung einer WZM sollen daher als entsprechende Anschaffungskostendifferenz der drehzahl geregelten zur konventionellen Pumpen-Motor-Gruppe 1.265 € erwartet werden.

Die durch die Gestaltungsmaßnahme reduzierten Energieverbräuche führen bei konstanten Bezugskosten für Energieträger zu geringeren Energiekosten. Die Höhe der Energiekosteneinsparung hängt stark von dem mit dem Stromnetzbetreiber vereinbarten Arbeitspreis (hier für das erste Jahr der Nutzungsdauer mit 0,10 €/kWh angenommen) ab. Ist die WZM mit einem drehzahl geregelten Elektromotor ausgestattet, ergeben sich basierend auf den veränderten Energieverbräuchen (siehe Bild 5) Einsparungen bei den Energiekosten (ΔEK) in Höhe von 215,52 € im ersten Jahr (siehe Formeln 1 und 2).

$$\Delta EK = (\bar{P}_u \cdot d - \bar{P}_g \cdot d) \cdot e, \text{ wobei } \bar{P} = \frac{E_Z}{T_Z} \quad (1)$$

- ΔEK *Differenz der Energiekosten (in €),*
 \bar{P}_u *durchschnittliche Wirkleistung pro fiktivem Zyklus für die konventionelle Pumpen-Motor-Gruppe (in kW),*
 \bar{P}_g *durchschnittliche Wirkleistung pro fiktivem Zyklus für die drehzahl geregelte Pumpen-Motor-Gruppe (in kW),*
 d *jährliche Laufzeit der WZM (in h),*
 e *Arbeitspreis (Entgelt) für die bezogene Wirkarbeit (in €/kWh),*

E_z Energieverbrauch pro fiktivem Zyklus (in kW),

T_z Dauer eines fiktiven Zyklus (in s).

$$\Delta EK = \left(\frac{89,80 \cdot 6000}{100} - \frac{53,88 \cdot 6000}{100} \right) \cdot 0,10 = 215,52\text{€} \quad (2)$$

Schritt 6: Bestimmung der Zielgrößenausprägung und Sensitivitätsanalyse

Im nächsten Schritt ist zu ermitteln, wie sich die Lebenszykluskosten der WZM insgesamt verändern und ob damit die Einsparungen bei den Energiekosten auch die Anschaffungskosten der Maßnahme decken. Die Lebenszykluskosten werden hier als Kapitalwertdifferenz bzw. Differenz im Auszahlungsbarwert und damit als Summe aller auf einen Zeitpunkt (hier wie üblich auf den Beginn des Lebenszyklus bzw. $t = 0$) abgezinsten, veränderten Auszahlungen ermittelt. Dabei wird unterstellt, dass die Anschaffungskosten der Komponenten jeweils zum Zeitpunkt $t = 0$, die jährlichen Energiekosten an den Periodenenden (in $t = 1, \dots, 10$) anfallen. Weiterhin wird angenommen, dass die in Schritt 5 ermittelten Energiekosten einer jährlichen Preissteigerung von 3 % (beginnend im ersten Jahr) unterliegen und dass der Kalkulationszinssatz 10 % beträgt. Die sich ergebende Kapitalwertdifferenz stellt das Kriterium für die Wirtschaftlichkeit dar: Ist diese größer Null, gilt die Maßnahme als vorteilhaft.

Die Kapitalwertdifferenz des drehzahl geregelten Elektromotors lässt sich davon ausgehend mit der folgenden Formel 3 berechnen. Bei deren Anwendung ergibt sich eine positive Kapitalwertdifferenz in Höhe von 263,09 € (siehe Formel 4).

$$\Delta KW = \Delta AK - \sum_{t=1}^{10} \Delta EK \cdot \frac{(1+p)^t}{(1+k)^t} \quad (3)$$

ΔKW Kapitalwertdifferenz (in €),

ΔAK Differenz der Anschaffungskosten von drehzahl geregelter und konventioneller Pumpen-Motor-Gruppe (in €),

p Preissteigerungsrate (in %),

k Kalkulationszinssatz (in %),

t Lebensdauer der WZM (in Jahre).

$$\Delta KW = -1265 + \sum_{t=1}^{10} 215,52 \cdot 1,03^t \cdot 1,10^{-t} = 263,09\text{€} \quad (4)$$

Neben der Steigerung der Energieeffizienz der WZM führt die Investition in eine drehzahlgeregelte Pumpen-Motor-Gruppe also auch zu einer Senkung der Lebenszykluskosten im Vergleich zur konventionellen Variante. Die gesetzlichen Maßnahmen sind damit – zumindest unter den hier getroffenen Annahmen und innerhalb der recht eng definierten Systemgrenzen – als vorteilhaft und damit wirtschaftlich sinnvoll anzusehen (zu einem ähnlichen Ergebnis siehe auch [12]).

Da die hier verwendeten Daten insbesondere im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen mit Unsicherheiten verbunden sind, sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, wofür sich insbesondere Sensitivitätsanalysen anbieten. Diese eignen sich dazu, das bestehende Ausmaß an Unsicherheit abzuschätzen, besonders relevante Modellparameter zu identifizieren und deren maximal zulässige Abweichungen zu ermitteln. Darauf aufbauend können ggf. gezielte Maßnahmen zur Gegensteuerung abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den drehzahlgeregelten Elektromotor sind in Bild 6 dargestellt.

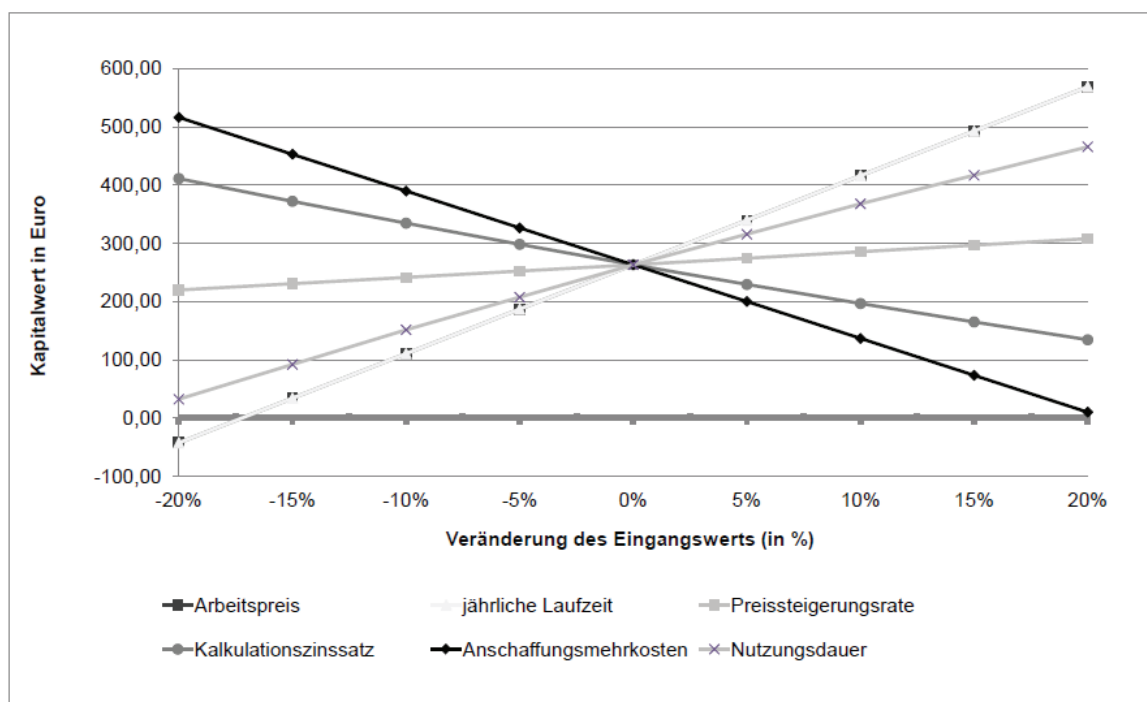


Bild 6: Sensitivitätsanalyse²

² Bei der Variation der Nutzungsdauer wird auf die Annahme, dass alle Zahlungen jeweils an den Periodenenden (in $t = 1, \dots, 10$) anfallen, verzichtet, um den Zeitpunkt der Amortisation „unverzerrt“ der Abbildung entnehmen zu können.

Die Abbildung zeigt die Verläufe der Kapitalwertdifferenzen in Abhängigkeit von der Veränderung einzelner Eingangswerte. Jeweils nicht analysierte Größen werden dabei als konstant angenommen. Die Ausgangssituation markiert der Schnittpunkt aller Geraden; unter den oben angenommenen Eingangswerten ergibt sich eine (positive) Kapitalwertdifferenz von 263,09 €. Führt nun eine Veränderung der Eingangswerte zu einer negativen Kapitalwertdifferenz, liegt keine Vorteilhaftigkeit (mehr) vor; der zugehörige Abszissenwert stellt die Vorteilhaftigkeitsschwelle dar.

Es ist ersichtlich, dass die jährliche Laufzeit und der durchschnittliche Arbeitspreis die kritischsten Faktoren bezüglich der Vorteilhaftigkeit der Investition darstellen. Die entsprechenden Verläufe der Kapitalwertdifferenzen sind hier am steilsten, d. h., Zielgröße reagiert am empfindlichsten auf eine Veränderung dieser Inputgrößen. So könnten eine Verringerung der Laufleistung um mehr als 17 % (auf ca. 5.000 Stunden) oder eine Senkung des Arbeitspreises um mehr als 20 % (auf 0,08 €/kWh) die Vorteilhaftigkeit des konventionellen Antriebssystems bedingen. Der Arbeitspreis steigt jedoch tendenziell, so dass diesbezüglich nicht mit einer Veränderung des Ergebnisses der wirtschaftlichen Bewertung zu rechnen ist. Anders ist dies hingegen bei der Laufleistung, die einen unternehmensspezifischen Eingangswert darstellt; es sollte also jeweils hinterfragt werden, ob die anzuschaffende WZM über die Nutzungsdauer hinweg durchschnittlich mindestens knapp 5.000 Stunden läuft, da ein drehzahlvariabler Antrieb ansonsten nicht lohnend wäre. Vergleichsweise dazu gelten in [13] Motoren ab einer Jahresleistung von 2.500 Stunden als wirtschaftlich.

5 Fazit

Anhand der Ergebnisse zeigt sich für das untersuchte BAZ eine sowohl energetische als auch wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit. Die Erfüllung der Anforderungen aus der Ökodesign-Richtlinie bringt damit – zumindest aus Sicht der hier vorgenommenen Betrachtung – einen entsprechend nutzenstiftenden Lenkwirkung mit sich. Zur besseren Aussagekraft wäre jedoch in einem nächsten Schritt eine vergleichende Analyse von Motoren höherer Energieeffizienzklassen wünschenswert, um bspw. beim Erwerb neuer WZM bezüglich der Motorenausstattung zwischen einem effizienteren Motor oder einer Drehzahlregelung eine energetisch und wirtschaftlich sinnvolle Entscheidung treffen zu können.

Bei dieser Entscheidung ist ungeachtet dessen, der jeweils konkrete Hintergrund zu prüfen und im Einzelfall die beste Alternative auszuwählen. Unterstützung bietet hierbei die Methodik zur integrierten energetisch-wirtschaftlichen Bewertung einschließlich Vorgehensmodell, die sich als hilfreicher Rahmen für die Durchführung der Bewertung erwiesen hat. Eine besondere Herausforderung stellt und stellt die Gewinnung von energetischen Langfristdaten dar, die (nach wie vor) auf Basis von

Kurzzeitmessungen prognostiziert werden. Daraus lässt sich schließen, dass insbesondere die Erarbeitung von Instrumenten und Methoden zur Verbesserung der Datenbasis sowie deren Einbindung in die Methodik voranzutreiben ist.

Weitere Forschungen könnten sich auf den Einfluss der Betriebszustände (in ihrer Dauer und Reihenfolge) über lange Zeiträume (wie die hier zugrundegelegten 10 Jahre), Grundschwingungs- und Verzerrungsblindleistungen sowie die Anlaufströme des Hydraulikaggregats auf den Energiebedarf und mögliche Effizienzpotenziale in WZM erstrecken. Ansatzpunkte für methodische Erweiterungen bieten sich darüber hinaus bezüglich des Wirtschaftlichkeits-Bausteins im Hinblick auf die Einbeziehung zusätzlicher hier ausgeblendeter Kostenkategorien. Des Weiteren könnte untersucht werden, inwiefern sich der Ersatz ungeregelter Antriebe durch geregelte Elektromotoren in vorhandenen WZM lohnt.

Acknowledgement

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



Literaturangaben

- [1] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: Elektrische Antriebe - Energieeffizienz wird zunehmend reglementiert, URL: www.zvei.org/Verband/Fachverbaende/Automation/Seiten/Elektrische-Antriebe-Energieeffizienz-wird-zunehmend-reglementiert.aspx [26.07.2012]
- [2] Neubert, T.: Untersuchungen von drehzahlveränderbaren Pumpen, Shaker, Aachen, 2002
- [3] Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.: Integrated Methodology for the evaluation of the energy- and cost-effectiveness of machine tools, in: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2012, 5(3), S. 151-163
- [4] Kuhrke, B.: Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen, epubli, Berlin, 2011

- [5] Hagemann, D.: *Die energieeffiziente Werkzeugmaschine - Rahmenbedingungen und Lösungen für eine nachhaltige Fertigungstechnik*, Symposium „Die energieeffiziente Werkzeugmaschine“, Düsseldorf, 2010
- [6] Bosch Rexroth AG: *Produktbeschreibung*, URL:
www.boschrexroth.com/borexmvz2/Detailview.jsp?publication=NET&ccat_id=24610&edition_id=1115230&document_id=1115229 [27.07.2012]
- [7] Neugebauer, H.; Westkämper, E.; Klocke, F.; Kuhn, A., Schenk, M.; Michaelis, A.; Spath, D.; Weidner, E.: *Abschlussbericht – Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Chemnitz, 2008
- [8] Bosch Rexroth AG: *Produktbeschreibung*, URL:
www.boschrexroth.com/RDSearch/rd/r_08041/rd08041_2011-06.pdf
[12.07.2012]
- [9] Bosch Rexroth AG: *Pressemitteilung*, URL:
www.boschrexroth.com/country_units/europe/germany/de/unternehmen/press_e/presseinformationen/produktinformationen/dc_ia_de/archiv_2012/PI_022_12_de/PI_022_12_de.pdf [12.07.2012]
- [10] Lindner, R.; Götze, U.: *Lebenszykluskostenrechnung als Instrument der energiebezogenen wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen*, in diesem Band, S. 115-129
- [11] Götze, U.: *Investitionsrechnung, Modelle und Analysen zur Vorbereitung von Investitionsentscheidungen*, 6. Aufl., Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg, 2008
- [12] o. A.: *Planungs- und Bewertungsinstrumente für eine ressourceneffiziente Produktion*, in: VDI-Z, 2012, 154(7/8), S. 10-11
- [13] Mauchle, P.: *Lebenszykluskosten von Motoren*, Merkblatt für die Beschaffung von Motoren unter der Vollkostenbetrachtung, URL:
www.bfe.admin.ch/dossiers/01915/index.html?lang=de [02.08.2012]