

Werkzeugmaschinen energetisch vergleichen – der schwierige Weg zum Energielabel

Reimund Neugebauer¹, Volker Wittstock², Jörg Paetzold²

¹ Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz

² Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Technische Universität Chemnitz

Abstract

Spanende Werkzeugmaschinen (WzM) stellen einen zentralen Faktor in der Produktion technischer Güter dar. Sie haben einen erheblichen Anteil am industriellen Energieverbrauch und fanden somit Aufnahme in die ErP-Richtlinie 2009/125/EG (Ökodesign-Richtlinie) für energiegetriebene Produkte. Ähnlich Konsumgütern, wie oder, müssen WzM nachweislich energieeffizient werden, wofür geeignete Bewertungsgrößen benötigt werden. Diese Größen werden für die Beispiele Kühlschränken und Personenkraftwagen kurz erläutert und die Nutzbarkeit in der Produktionstechnik betrachtet. Im Kern des vorliegenden Artikels werden Lösungsansätze untersucht, um Kenngrößen, die für Werkzeugmaschinen relevant sind, ortsunabhängig und mit geringem Datenerfassungs- und Messaufwand zu gewinnen.

1 Einleitung

Durch die Aufnahme der Werkzeugmaschinen (WzM) in die ErP-Richtlinie 2009/125/EG (Ökodesign-Richtlinie, Nachfolge der EuP-Richtlinie 2005/32/EC) für energiegetriebene Produkte [1] müssen diese, ähnlich Konsumgütern, wie Autos oder Kühlschränken, nachweislich energieeffizient werden, wofür geeignete Bewertungsgrößen benötigt werden. Es stellt sich die Frage, ob bekannte Methoden aus anderen Bereichen auf WzM mit ihren vielfältigen Bauformen, Verfahren und Einsatzbedingungen anwendbar sind. Sind unterschiedlichste WzM anhand einer einzigen Effizienzzahl oder Effizienzklasse zwischen G bis A+++ vergleichbar?

Die Norm EN ISO 14020 definiert: „Das übergeordnete Ziel von Umweltkennzeichnungen und -deklarationen ist, durch Mitteilung von überprüfbaren, genauen und nicht irreführenden Angaben zu Umweltaspekten Angebot und Nachfrage von Produkten zu unterstützen, die weniger Umweltbelastungen verursachen, wodurch das Potential von marktgetriebenen kontinuierlichen Umweltverbesserungen angeregt wird.“ [2]

In einem Interview aus dem Jahr 2008 äußerte Hr. Dr. Mori, Präsident von Mori Seiki Co. Ltd: „Wenn wir neue Maschinen auf den Markt bringen, versuchen wir, den benötigten Energieverbrauch um mindestens 10 % im Vergleich zum Vorgängermodell zu reduzieren.“[3] Darüber hinaus erwartet er seitens der Europäischen Union eine strenge Gesetzgebung hinsichtlich der Energieeffizienz von WzM. Als Reaktion auf die ErP-Richtlinie nutzte der Europäische Verband der WzM-Industrie CECIMO die Möglichkeit einer Selbstregulierungsinitiative (SRI) [4] mit einem ausschließlichen Bezug zu metallbearbeitenden Maschinen. Neben der Ausarbeitung einer entsprechenden Norm [5] sieht der Entwurf vor:

- den Energieverbrauch im Lebenszyklus (LCA-LifeCycleAssessment) von WzM zu ermitteln,
- einen individuellen Stand der Technik (business as usual - BAU) als Vergleichsgrundlage für Verbesserungsmaßnahmen zu ermitteln und festzulegen,
- eine Liste von Verbesserungsmaßnahmen mit zugehörigem Verbesserungspotenzial zu erstellen und
- die Fortschritte Hersteller in der Effizienzverbesserung jährlich an die EU-Kommission zu melden.

Dem gegenüber wird seitens der EU eine Produktgruppenstudie erarbeitet, deren Ergebnisse in Meetings veröffentlicht und mit Vertretern der WzM-Industrie diskutiert werden. Ein zufrieden stellender Vorschlag im Sinne eines Energielabels zum Vergleich unterschiedlicher Maschinen scheint jedoch noch nicht gefunden. Vor allem die Inhomogenität des Produktes WzM mit über 400 Typen in über 2000 Ausführungen erschwert die Suche nach Vergleichskriterien [4].

2 Bestehende Ansätze

2.1 Umweltkennzeichnung

Im Folgenden wird eine Übersicht über bestehende Ansätze zur Bewertung der energetischen Effizienz technischer Güter gegeben. Ansätze und Regeln zur Erteilung von Umweltlabel wurden bereits in der Normenreihe ISO 14020 ff erarbeitet, die unter anderem folgende Normen enthält:

- DIN ISO 14024 - Umweltkennzeichnungen und -deklarationen (Umweltkennzeichnung Typ I) - Grundsätze und Verfahren
- DIN ISO 14021 - Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung vom Typ II)
- DIN ISO 14025 - Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren

Bei der Kennzeichnung unterscheidet man zudem qualitative und quantitative Label. Bei qualitativen Aussagen wird der Nutzer mittels gut/schlecht Bewertung von Merkmalen oder über das prinzipielle Vorhandensein von Merkmalen informiert. Quantitative Labels geben hingegen konkrete Zahlenwerte an. Mischformen sind ebenfalls verbreitet.

2.2 Energiekennzahlen

Energiekennzahlen sind im Allgemeinen Verhältniszahlen bestimmter, technischer Größen. Sie ermöglichen somit den Vergleich unterschiedlicher technischer Systeme bezogen auf diese Bezugsgrößen.

Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad η ist eine dimensionslose Kennzahl zur Beurteilung der Effizienz technischer Systeme. Unter Wirkungsgraden versteht man Verhältnisse aus abgegebenen Zielenergieströmen und aufgewandten Energieströmen (Aufwand) [6], oder vereinfacht als Quotient aus Nutzen und Aufwand. Je nach Betrachtungszeitraum und Systemeigenschaften (stationäre oder instationäre Prozesse) können Leistungen oder Energien gegenübergestellt werden. Wirkungsgrade sind zudem „zukunftsfähig“, da der Wirkungsgrad nie größer 1 werden kann (Energieerhaltungssatz) womit ein „natürliches“ Limit existiert. Grundvoraussetzung zur Wir-

Wirkungsgradbestimmung ist in jedem Fall eine klare Definition der Ein- und Ausgangsgrößen (Aufwand und Nutzen). Für Elektromotoren berechnet sich der Wirkungsgrad bspw. aus dem Verhältnis zwischen abgegebener mechanischer Wellenleistung und aufgenommener elektrischer Gesamtleistung und ist, wie Bild 1 zeigt, stark von der Baugröße (Leistung) des Motors abhängig. Mit EFF1 und EFF2 sind im Bild 1 die alten Kennzeichnungen angegeben. Um dem technischen Fortschritt Rechnung zu tragen (EFF1 war bereits die höchste Effizienzklasse), wurden die derzeit gültigen Effizienzklassen eingeführt, wobei die höchste Zahl für die höchste Effizienzklasse steht. Seit 16.06.2011 dürfen im Europäischen Wirtschaftsraum Elektromotoren mit einer Leistung von mehr als 0,75 kW nur noch mit der Effizienzklasse IE 2 oder höher in den Verkehr gebracht werden [7]. Die Angabe der Effizienzklasse ist in diesem konkreten Fall u. a. auch von dessen Größe (Leistung) abhängig.

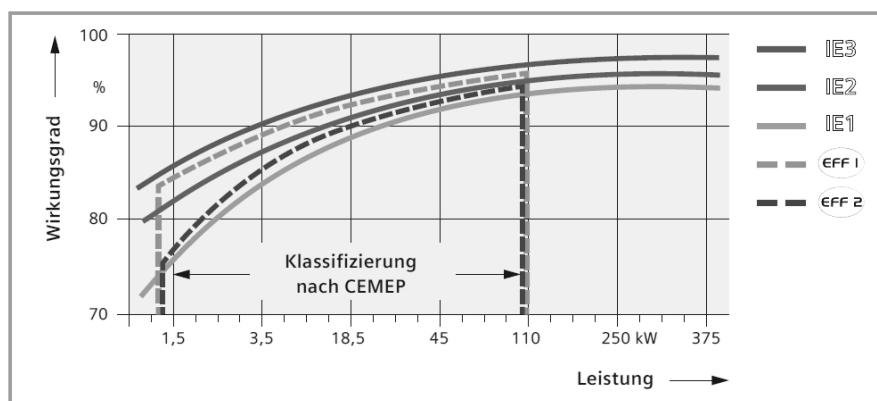


Bild 1: Wirkungsgrade und Effizienzklassen für Elektromotoren [7]

Spezifischer Energieverbrauch

Der spezifische Energieverbrauch bzw. -bedarf ist im Gegensatz zum Wirkungsgrad eine bezogene Größe. Dabei wird der Energieeinsatz auf eine geeignete funktionale Einheit FE des Produktes oder der Dienstleistung bezogen [6]. Es ist die wichtigste Kennzahl zur Beurteilung von Maschinen, Anlagen und Prozessen. Die Energieintensität gibt den Energieeinsatz je Bezugsgröße an, z. B. in kWh/Stück. oder kWh/m², während die Energieproduktivität den reziproken Wert darstellt. Die praxisorientierten Angaben des spezifischen Energieverbrauchs liefern dem

Anwender klare Anhaltspunkte für den zu erwartenden Energieaufwand und ermöglichen somit einen anwendungsbezogenen Vergleich.

2.3 Konsumgüter

Das bekannte EU-Energielabel, welches 1998 eingeführt wurde und sichtbar auf jedem zu verkaufenden Gerät angebracht sein muss, bewertet derzeit vor allem die Energieeffizienz von Konsumgütern wie Leuchten, Heimelektronik (TV-Geräte) und so genannter Weißware (Waschmaschinen, Kühlschränke, Küchenherde, ...) [8]. Es hat eine 7-stufige Farbskala (grün bis rot) und zusätzlich die Buchstaben A bis G, bei Kühl- und Gefriergeräten sowie Waschmaschinen inzwischen von A+++ bis D. Effizienzklassen höher D sind inzwischen kaum mehr existent, da praktisch unverkäuflich. Wie das Beispiel Weißware zeigt, erfordert der technische Fortschritt ständige Anpassungen. Um nicht noch mehr Plus-Symbole an die Klasse A anzuhängen, geben in Zukunft Jahreszahlen über die Gültigkeit bzw. die Aktualität des Labels Auskunft.

Das Vorgehen bei der Ermittlung der Energieeffizienzklasse für Kühl- und Gefriergeräte [9] ist bspw. folgendes:

1. Ermittlung des Bruttovolumens
2. Ermittlung des Nutzvolumens
3. Berechnung des korrigierten Nutzvolumens
4. Zuordnung eines Soll-Jahresverbrauchs
5. Ermittlung des tatsächlichen Verbrauchs
6. Zuordnung einer Energieeffizienzklasse

Als Testbedingungen wurden 4 verschiedene Klimaklassen eingeführt. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Bauformen wurde in 10 Geräteklassen unterteilt und entsprechende Korrekturfaktoren zur Berechnung des Soll-Jahresverbrauchs definiert. Ein Soll-Jahresverbrauch von 100 % (Klasse D) entspricht dem Durchschnittswert für diese Geräte aus dem Jahr 1998, also dem Erstausgabedatum der Norm [9]. Die Messung des realen Energieverbrauchs erfolgt unter normierten Messbedingungen. Diese schreiben quaderförmige Prüfpakte mit definiertem Gewicht und Material vor, welche bei voller Kühlschrankbeladung über einen festgelegten Zeitraum auf einer zu überwachenden Kühltemperatur gehalten werden. Nach der Messung des tatsächlichen Verbrauchs erfolgt die Eingliederung in eine Energieeffizienzklasse anhand der prozentualen Abweichung zum Soll-

Jahresverbrauchs. Die derzeit typische Effizienzklasse A++ verbraucht bspw. nur noch 30 % des Wertes bei der Festlegung des Vergleichsniveaus von 100 % und ist somit um den Faktor 3 effizienter. Der gemessene Energieverbrauch wird außerdem auf ein Jahr hochgerechnet und erscheint als Absolutwert auf dem Label.

Für Geschirrspüler wird bspw. ein normierter Energieverbrauchsindex als Quotient aus dem gemessenen Energieverbrauch und einem errechneten Energieverbrauch gebildet, der in Abhängigkeit zur Kapazität des Geschirrspülers steht [10] und als Grundlage zur Klassifizierung dient. Zudem erscheint der spezifische Energiebedarf für einen typischen Waschgang als Zahlenwert auf dem Label.

Die Kennzeichnung von Personenkraftwagen (PKW) erfolgte bisher mittels Energieverbrauch/CO₂-Ausstoß bezogen auf 100 km Fahrstrecke in den Fahrzyklen (Einsatzszenarien): Stadt, Landstraße, Autobahn. Seit dem 1. Dezember 2011 werden nun auch Autos mit dem Energielabel A bis G ausgewiesen. Mit der Umsetzung der EU-Verordnung in nationales Recht wird nun in Deutschland der Verbrauch bezogen auf das Fahrzeuggewicht angegeben. Dies hat zur Folge, dass ein schwereres, dieselgetriebenes Fahrzeug mit etwas höherem CO₂-Ausstoß, eine bessere Effizienzklasse (B) erreichen kann, als ein gleiches Modell mit Benziner (Effizienzklasse C) [11]. Dies gilt umso mehr für SUVs, die, selbst mit Hybrid-Antriebstechnik ausgestattet, immer noch fast doppelt so viel CO₂ ausstoßen wie Kleinwagen und dennoch eine bessere Effizienzklasse erreichen [11]. Das Ziel einer verbraucher- und vor allem klimaschutzfreundlichen Kennzeichnung kann somit nicht als erreicht betrachtet werden.

2.4 Gebäude

Der bekannte Energieausweis (auch Energiepass) für Wohn- und Nichtwohngebäude hat, ähnlich dem EU-Energielabel für Konsumgüter, eine gute Nutzerfreundlichkeit, d. h. leichte Verständlichkeit, hohe Transparenz und schnelle Orientierung. Er gibt als wichtigste Kennziffer den spezifischen, flächenbezogenen Energieverbrauch eines Gebäudes auf Grundlage des berechneten Energiebedarfs bzw. gemessenen Energieverbrauchs an. Dabei können die Angaben in Heiz- und Elektroenergieverbrauch (verbrauchsorientiert) oder Nutz-, End- und Primärenergiebedarf sowie einzelne Verbrauchergruppen (bedarfsorientiert) aufgeschlüsselt sein, wie Bild 2 zeigt. Es sind in jedem Fall Vergleichswerte zum Stand der Technik bzw. zu gesetzlichen Anforderungen enthalten. Die gemessenen Werte im verbrauchsorientierten Energiepass berücksichtigen demnach das Nutzungsverhalten,

welches sich jedoch über die Zeit ändern kann und somit keine Aussage zur Qualität der Gebäudehülle bzw. der installierten Technik erlaubt. Ein Energiepass ist 10 Jahre gültig.

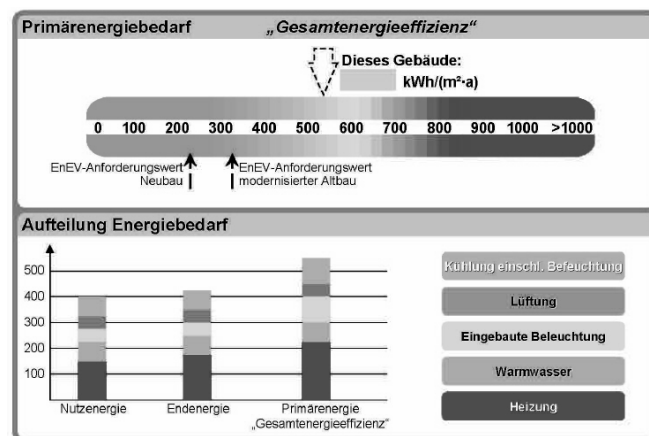


Bild 2: Kennzahlendarstellung im bedarfsorientierten Energieausweis für Nichtwohngebäude [12]

Insbesondere in seiner bedarfsorientierten Ausprägung mit der Aufteilung des Energiebedarfs (vgl. Bild 2) enthält der Energiepass interessante Ansatzpunkte zur Darstellung der Energieeffizienz von WzM. Darüber hinaus besteht eine enge Verknüpfung zwischen WzM und Gebäude. Während das Gebäude die Umweltbedingungen (Klima, Energiequalität) für WzM vorgibt und somit Einfluss auf deren Energieverbrauch hat, stellt die WzM eine Energiequelle im Gebäude dar. Aufgrund dieser energetischen Wechselwirkungen sollte deshalb beim Einsatz effizienterer WzM immer eine ganzheitliche Betrachtung des Systems „Fabrik“ erfolgen [13].

2.5 Industriegüter

2.5.1 Sächsischer Gewerbeenergiepass

Das Anliegen des Sächsischen Gewerbeenergiepass (SäGEP) ist die umfassende energetische Beratung gewerblicher Unternehmen. Bei den dabei vorgenommenen Analysen werden neben organisatorischen Maßnahmen und allgemeinen Querschnittstechnologien, wie bspw. Gebäudehülle, Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik oder Druckluftversorgung, vor allem branchenspezifische Energieeffizienz-

potenziale in Prozessen und Produktionsanlagen untersucht. Im Ergebnis dieser Untersuchung wird u. a. auf einer Skala (vgl. Bild 3) der Ist-Zustand dem Stand der Technik (SdT) gegenübergestellt sowie das vom Unternehmen real erreichbare Einsparpotenzial (ESP) angegeben. Es handelt sich demnach um vergleichende Angaben zu entsprechenden Branchenkennzahlen, welche dem zertifizierten Berater in speziellen Datenbanken zur Verfügung gestellt werden. Herauszustellen ist hier, dass ein Standard nach dem Stand der Technik definiert wurde, der, ähnlich dem Beispiel Kühl- und Gefriergeräte, fortschreitend Anpassungen erfordert und sich in wenigen Jahren um ein vielfaches verändert haben kann.

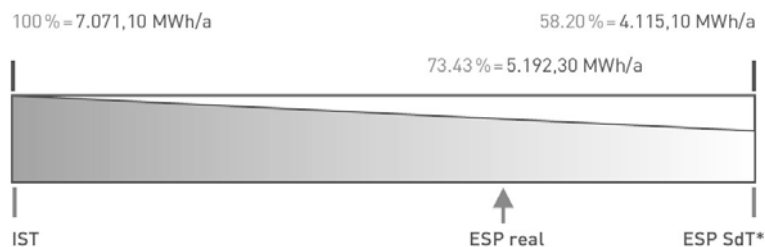


Bild 3: Vergleichende Darstellung der Energieeffizienz nach SäGEP [14]

2.5.2 Kunststoff verarbeitende Maschinen

Einen lohnenden Blick zu verwandten Produktionsmaschinen bieten die Kunststoff verarbeitenden Maschinen für Extrusion und Spritzguss. In dem 2010 abgeschlossenen Projekt [15] wurde ein Label zur Kommunikation der Energieeffizienz entwickelt und publiziert. Die Entwicklung erfolgte in enger Kooperation von Industrie und Forschungseinrichtung. Es wurden ein Energiemessstandard entwickelt, ein Effizienzkriterium festgelegt, Energieklassen gebildet und das Kommunikationsinstrument „Energietabel“ mit einem Energieeffizienzindex (EEI) geschaffen. Analog zu spanenden WzM [4] liegt ein Großteil der Umweltauswirkungen einer Kunststoff verarbeitenden Maschine in der Nutzungsphase und ist darin um ein Vielfaches höher als in den anderen Lebensphasen [15].

Im ersten Schritt wurden deshalb Testbedingungen definiert, welche die Vergleichbarkeit verschiedener Maschinen sicherstellen. Für Spritzgussmaschinen wurde mit der Umsetzung der branchenspezifischen Normung EUROMAP 60 bereits eine Standardisierung der Energiemessung vollzogen. Über den Standard für Extrusions-Maschinen (EUROMAP 90) konnte bisher noch keine Einigung erzielt werden. Als Effizienzkriterium wurde die spezifische Energie [kWh/kg] bestimmt,

welche theoretisch notwendig ist, um das Material zu schmelzen. Dieser Wert ist praktisch nicht erreichbar.

Energieklasse	Anlagen- bzw. Technologietyp dieser Energieklasse
A	BNAT (best not available technology)
B	BAT (best available technology)
C	Stand der Technik
D	schlechter als Stand der Technik
E	alter Stand der Technik
F	schlechtester im Feld verfügbarer alter Stand der Technik

Bild 4: Allgemeine Einteilung der Energieklassen bei KvM [15]

Bild 4 zeigt die Einteilung der Klassen, die auf den Ergebnissen vieler Messungen basiert und auf der die Bildung des Energieeffizienzindex (EEI) beruht. Dieser setzt, ähnlich einem Wirkungsgrad, das Effizienzkriterium theoretisch notwendige Energie zum gemessenen Energieverbrauch ins Verhältnis. Der Kennwert wird zudem durch Faktoren beruhend auf

- dem verfahrensspezifisch minimal nötigen Grundbedarf an Nebenprozessen,
- nach BNAT mindestens erforderlichen Verarbeitungsverlusten,
- dem eingesetzten Material und bestimmten Umwelteinflüsse sowie
- Testbedingungen

korrigiert. In Bild 5 sind zwei der entstandenen Energieeffizienzlabel dargestellt. Sie beinhalten neben der sehr anschaulichen Klassifizierung und dem EEI, auch Angaben zu Maschinentyp, Verfahren, zu verarbeitendem Material sowie spezifischem Energieverbrauch unter verschiedenen Belastungen oder Verarbeitungsverfahren.

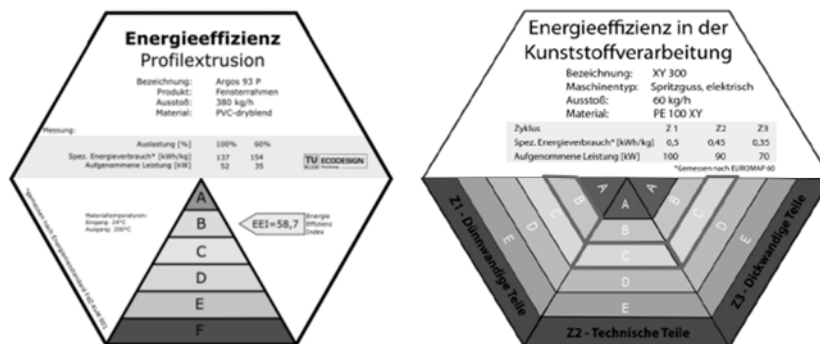


Bild 5: Offizielles Energieeffizienzlabel für Extruder (links) und Vorschlag für Spritzgussmaschinen (rechts) [15]

2.5.3 Werkzeugmaschinen

Wirkungsgrad

In wie weit ist die Methode des Wirkungsgrades auf WzM übertragbar und welche Aussagen können dabei getroffen werden? Eine WzM besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten. Der Gesamtwirkungsgrad η_{Gesamt} könnte als Produkt aller Einzelwirkungsgrade η_{Komp_i} dargestellt werden:

$$\eta_{Gesamt} = \prod_{i=1}^n \eta_{Komp_i} \quad (1)$$

Bspw. verbrauchen Elektromotoren einen großen Teil der elektrischen Energie in WzM. Die in Bild 1 dargestellten Wirkungsgrade von Elektromotoren sind jedoch nicht in allen Drehzahl- und Drehmomentverhältnissen gleich. Vielmehr existiert ein motortypisches Wirkungsgradkennfeld, welches in den Teillastbereichen stark abfallen kann. Beispielhaft zeigt Bild 6 die Wirkungsgradkennfelder eines Synchronmotors (links), wie er typischerweise in Vorschubantrieben von WzM eingesetzt wird, und des Hauptantriebs eines Fräs-Bearbeitungszentrums (BAZ) [17].

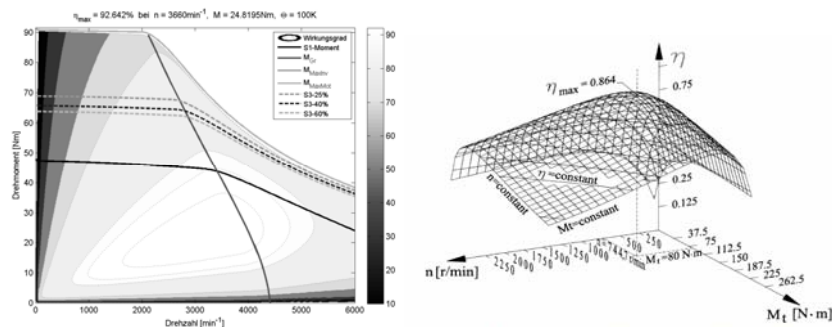


Bild 6: Wirkungsgradkennfeld eines Synchron-Motors (Siemens 1FT6086-8WF77) [16] und eines Fräs-BAZ (nur Haupt- und Vorschubantriebe) [17]

Servomotoren in WzM arbeiten sehr dynamisch und somit nur selten in der Nähe ihres Wirkungsgradoptimums [18]. Es kommt daher vielmehr auf die Dimensionierung und das Zusammenwirken der Komponenten an. Um dies zu berücksichtigen, ist es daher sinnvoll, Wirkungsgrade über geeignete Messungen zu bestimmen. Problematisch kann dabei die Definition des zu erzielenden Nutzens sein. Wird hier der eigentliche Prozess der (z. B. spanenden) Formgebung festgelegt, so ergibt sich in Nebenzeiten (Positionieren, Auslaufweg, Werkzeugwechsel, etc.) mit einer Nutzleistung von Null ein Wirkungsgrad von Null. Die Effizienz einer WzM könnte

somit ausschließlich während der Hauptzeit (Werkzeug im Eingriff) beurteilt werden. Eine gewisse Entlastung dieser strengen Sichtweise bietet die Einteilung in primären (Formgebung inkl. Prozesskonditionierung) und sekundären Nutzen (Logistik, Kühlung, Sensorik, Steuerung etc.), wie es in [19] vorgeschlagen wird. Mit der Betrachtung über den gesamten Zeitraum einer Fertigungsaufgabe und dem Vergleich der Energien anstatt der Leistungen, sind Phasen ohne Formgebungsprozess einbeziehbar. Dies führt jedoch zu einer Verfahrens- und Prozessabhängigkeit, da erst eine repräsentative Fertigungsaufgabe definiert werden muss. Anhand umfangreicher experimenteller Untersuchungen konnte in [17] am Beispiel eines Fräs-BAZ gezeigt werden, wie groß der Einfluss einzelner Zerspanungsparameter auf den Wirkungsgrad sowie den spezifischen Energiebedarf je Zeitspanvolumen ist. Die Vielzahl möglicher Randbedingungen würde somit die Aussagekraft einer solchen Kennzahl verwischen.

Effizienzzahl EE

Den Ansatz eines energetischen Vergleichs von WzM mittels eines technologieunabhängigen Prüfzyklus wird in [20] vorgestellt. Technologieabhängig sind werkstück- bzw. werkzeugbezogenen Parameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl, innere oder äußere Kühlschmierstoffzufuhr (KSS-Zufuhr), Spannvorrichtung bzw. Spannhydraulik, Werkstück- und Vorrichtungsgewicht sowie Bearbeitungswege. Der vorgeschlagene Prüfzyklus ermittelt deshalb einen maschinenbezogenen Energieverbrauch. Während 50 % der Prüfzyklusdauer von 15 min werden Werkzeugwechselzyklen (7,5 min) mit definiertem Werkzeug inkl. der Bewegung aller Achsen im Eilgang (Anfahrt eines entfernten Punktes im Arbeitsraum), Maximaldrehzahl und Zuschaltung der kompletten KSS-Zufuhr für jeweils 1 s, durchgeführt. Zu jeweils 25 Prozent (3,75 min) werden ein Arbeitszyklus (Achsbewegungen ohne Fertigungsprozess) und ein Ruhezyklus durchfahren. Die einzelnen Zyklen werden nacheinander abgearbeitet. Gemessen wird während dessen die verbrauchte Druckluftmenge Q_v und der Elektroenergieverbrauch am Hauptanschluss, welcher noch durch spezielle Korrekturfaktoren in den Energieverbrauch E_{vk} zu überführen ist. Die Energieeffizienzziffer EE mit der Einheit [Anzahl/(kW/h • m³/h)] berechnet sich nach der Formel:

$$EE = \frac{\text{Anzahl der durchgeführten Werkzeugwechsel} \cdot 4}{E_{vk} \cdot Q_v \cdot \text{Anzahl Hauptspindeln}} \quad (2)$$

Positiv ist anzumerken, dass dieser Ansatz maschinenspezifische Faktoren wie Geometrie, Anzahl der Achsen, installierte KSS-Pumpen und „unproduktive“

Nebenzeiten wie Werkzeugwechsel berücksichtigt. Einzelheiten wie die Wahl der Zeitanteile der Operationen (z. B. 50 % für Werkzeugwechsel) sowie der Faktor 4 in der Formel bedürften einer Erläuterung.

WzM-spezifische Normung

Die derzeit in der Erarbeitung befindliche Norm ISO 14955 – „Environmental evaluation of machine tools“ für metallbearbeitende, spanende und umformende WzM [5] entstand in Folge der Aufnahme der WzM in die EU ErP-Richtlinie [1]. Darin beschreibt Teil 1 eine Methodik zur energieoptimierten Konstruktion, womit die Eco-Design-Standards [1] auf WzM Anwendung finden sollen. Teil 2 umfasst die Analyse des Energieverbrauchs von WzM bzw. deren Komponenten. Perspektivisch sollen in den Teilen 3 und 4 jeweils Testwerkstücke für spanende und umformende WzM definiert werden. Zentraler Teil des Workflows der Konstruktionsmethodik in ISO 14955-1 wird die Einteilung der Maschine in energieverbrauchsbezogene Funktionen und Komponenten sein (Bild 7 links und Mitte), und das unabhängig von Prozess, Verfahren und konstruktiver Ausführungen.

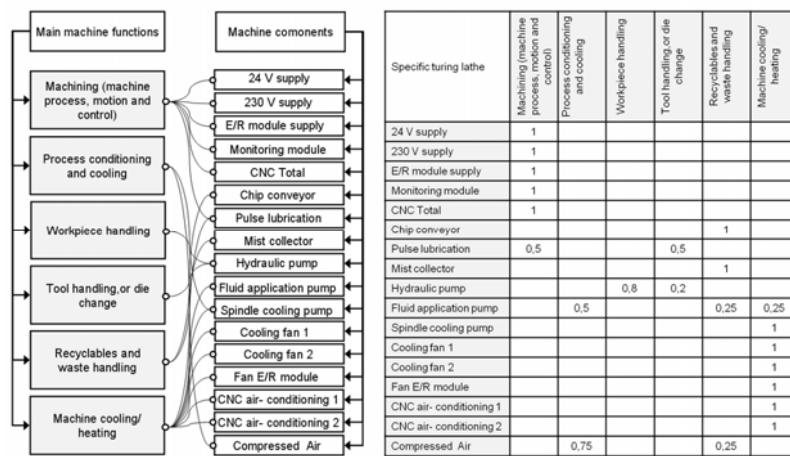


Bild 7: Entwurf ISO 14955 – Zuordnung von Komponenten zu Maschinenfunktionen [5]

Anschließend werden den Funktionen und Komponenten die jeweiligen Betriebsweisen zugeordnet. Des Weiteren werden derzeit 6 verschiedene Betriebszustände definiert, in denen dann die Maschinenkomponenten entsprechende Funktionen realisieren und somit den jeweiligen Energiebedarf bestimmen. Wie in [21] bereits gezeigt werden konnte, ist auf der Basis geeigneter Energieverbrauchsprofile, ähn-

lich Betriebszuständen, der Energieverbrauch spanender WzM gut prognostizierbar.

Aktuelle Forschungsarbeiten

Die Energiekosten stellen mit über 20 % inkl. der Druckluftkosten einen wichtigen Teil der Lebenszykluskosten einer WzM dar [22], mit deren Bewertung sich einige Forschergruppen auseinandersetzen [23], [24]. Darüber hinaus werden spezielle Werkzeuge entwickelt, um Energieverbräuche für reale Einsatzszenarien abzubilden und zu prognostizieren [25], [26]. Mittels 50 fest installierter Sensoren werden in [27] kontinuierlich alle Energieflüsse (inkl. Fluide) in einer WzM gemessen und somit sehr detailliert abgebildet. Diese Datenerfassung wird bspw. genutzt, um Effizienzverbesserungen durch neue Komponenten (z. B. drehzahlgeregelte Pumpen) zu validieren. Sie aber nur mit sehr hohem Aufwand an verschiedenen Maschinen einsetzbar.

2.6 Zwischenfazit

Das Beispiel der Kühl- und Gefrierschränke beschreibt ein ausgereiftes Vorgehensmodell mit definierten Geräteklassen, Korrekturfaktoren und Messbedingungen, da hier ein definiertes Benutzerprofil vorliegt. Gleiches gilt für Geschirrspüler und andere Geräteklassen unter dem EU-Label für Haushaltsgeräte. Vor allem in Verbindung mit der Angabe des Absolutwertes eines spezifischen Energieverbrauchs (bezogen bspw. auf ein Jahr oder eine Referenzbefüllung) erlaubt das Label einen guten herstellerübergreifenden Vergleich und eine Folgekostenabschätzung für das Produkt. Demgegenüber zeigt die neue Kennzeichnung für PKW deutliche Schwächen bei der Klassifizierung, insbesondere durch den zu großen Bezug zum Fahrzeuggewicht und die fehlenden Angaben zum tatsächlichen Verbrauch in den verschiedenen Fahrzyklen. Diese Aspekte deuten bereits die Herausforderungen an das Labeling der wesentlich inhomogeneren Produktgruppe „Werkzeugmaschinen“ mit ihren vielfältigen Ausprägungen und Einsatzgebieten an. Das Beispiel der Kunststoff verbreitenden Maschinen zeigt, dass ein Energie-Label auch für industriell eingesetzte Maschinen möglich ist. Dies wird jedoch durch die vielfach einfacheren und damit vergleichbareren Prozesse begünstigt.

Es existieren bereits gute Beispiele für Energie-Labels sowie erprobte Vorgehensweisen und Richtlinien (ISO 14020ff.). Das Labeling ist dennoch ein komplexer Vorgang mit vielen Randbedingungen, wobei vor allem der Einsatzfall klar definierbar sein muss. Die Herausforderungen für WzM liegen in der Vielfalt an Maschinen-

typen und Fertigungsverfahren. Gerade aufgrund der Vielzahl an Fertigungsverfahren sollte für spanende WzM eine weitgehende Prozessunabhängigkeit bei der vergleichenden Beurteilung der Energieeffizienz angestrebt werden.

3 Methodik für eine werkstatorientierte Energieeffizienzbewertung

3.1 Anforderungen

Die Grundlage der Kennwerterstellung für einen Vergleich unterschiedlicher WzM bilden genaue Kenntnisse über Einflussgrößen und deren Wirksamkeit. Einflussgrößen können u. a. aus den Anforderungen an WzM abgeleitet werden. „Die Forderungen an eine Werkzeugmaschine und ihre Beurteilung bilden eine Einheit. Der Aufbau, die technischen Daten und die Ausstattung mit Automatisierungseinrichtungen werden im Wesentlichen durch den Anwender und dem von ihm auf der Maschine zu verwirklichenden Prozess bestimmt“ [29]. Bild 8 gibt einen Überblick zu Anforderungen an WzM.

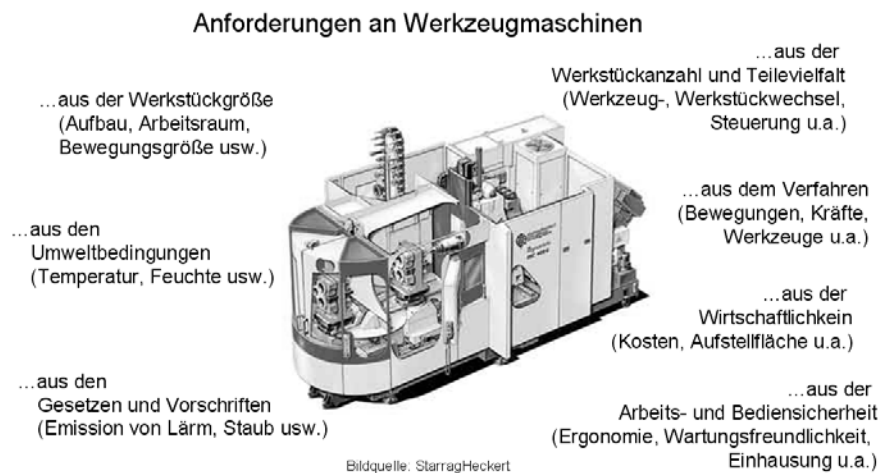


Bild 8: Anforderungen an WzM [29]

Anforderungen der Kunden an eine WzM resultieren somit aus den Themenfeldern Technologie, technische Eigenschaften, Qualität, Produktivität, Flexibilität, Umweltverhalten, Sicherheit, Komfort und Lieferbedingungen. Aber welche dieser Anforderungen hat nun welchen Einfluss auf den Energieverbrauch?

Einflussgrößen können Maschinendynamik, Schnittbedingungen, Anwendungsfall und weitere Randbedingungen sein und werden oftmals in Abhängigkeit des Beurteilenden zusammengefasst [30]. Darüber hinaus ist der Energieverbrauch von Prozessgrößen abhängig, trägt aber bei aktuellen CNC-Maschinen meist mit maximal 50 % zum Energieverbrauch bei.

3.2 Vorgehen

Die Energieeffizienz von WzM kann nur einer vergleichenden Bewertung unterzogen werden, wenn Bewertungskriterien gefunden und Einsatzfälle klar definiert werden. Bewertungskriterien sollen zudem transparent, allgemein anwendbar und sich durch angemessenen Datenerhebungs- und Messaufwand auch für die industrielle Praxis eignen. Dies erfordert einen Messaufbau, der mit wenigen Messpunkten flexibel vor Ort realisiert werden kann. Es wird deshalb eine Analyse-methode vorgestellt, bei der wenige Messpunkte durch andere (Maschinen-)Daten ergänzt werden. Daraus ergibt sich folgende Vorgehensweise:

1. Systematisieren möglicher Einflussgrößen auf den Energieverbrauch
2. Umfangreiche Datenerfassung und Messungen
3. Statistische Korrelationsanalysen
4. Aufzeigen signifikanter Einflussgrößen
5. Normierung auf Bezugsgröße
6. Ermittlung geeigneter Kenngröße
7. Bewertung und Vergleich

Die Ergebnisse aus Messung und Analyse werden mit allen erhältlichen Angaben aus Dokumentationen, Prospekten usw. abgleichen. Für die Forschungsarbeiten sind möglichst viele Einflussgrößen vieler Werkzeugmaschinen zu untersuchen, um zum einen alle „potenziellen“ Einflussgrößen zu erfassen und zum anderen, um statistische Sicherheit zu erhalten. Anschließend kann ein systematischer Vergleich mittels statistischer Korrelationsanalysen die tatsächlichen Abhängigkeiten zwischen Energieverbrauch und „potenziellen“ Einflussgrößen aufzeigen. Dies dient

der Festlegung signifikanter Daten und Messgrößen, welche zukünftig den Erhebungsaufwand für Analyse und Bewertung reduziert. Eine Normierung der als signifikant herausgearbeiteten Einflussgrößen ermöglicht die Bildung von Energiekennzahlen, welche einen energetischen Vergleich unterschiedlicher WzM ermöglichen.

3.3 Analyse und Messung

Zunächst ist es notwendig, Anforderungen an WzM zu definieren und zu systematisieren. Mittels Dokumentationen, Prospekten usw. sind Angaben zu den jeweiligen Eigenschaften und Anforderungen zu erfassen. Des Weiteren sind Daten zum realen Energieverbrauch erforderlich. Die Durchführung dieser Messungen basiert auf der Methodik zur Analyse des Energieverbrauchs an Werkzeugmaschinen [23]. Dabei sind die Einsatz- und Umweltbedingungen sowie angewandte Messmethoden genau zu dokumentieren. Um Maschinen im jeweiligen Ist-Zustand zu erfassen, sollten die erforderlichen Daten sowohl unter Laborbedingungen als auch im industriellen Einsatz in der „Werkstatt“ gewinnbar sein. Aus diesem Grund sollte wenig invasiv und somit parallel zum Maschinenbetrieb gemessen werden. Dies wird durch ein flexibel einsetzbares, mobiles Messsystem realisiert. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass alle relevanten Messgrößen auch erfassbar sind. So wird der Druckluftvolumenstrom an dessen Haupteinspeisung erfasst. Der Fokus liegt jedoch auf der Messung elektrischer Größen, da diese hauptsächlich den Energiebedarf einer spannenden WzM bestimmen. Außer der Wirkleistungsaufnahme finden spezifische Eigenschaften wie Blind- und Scheinleistung sowie Lastspitzen Berücksichtigung. Ein Detaillierungsgrad wie in [27], bei dem auch alle Fluidströme erfasst werden, wird aufgrund des sehr hohen Aufwandes und der eingeschränkten Praxistauglichkeit nicht angestrebt.

Dennoch ist der Aufwand des hier vorgestellten Vorgehens relativ hoch, da eine Vielzahl an Einflussfaktoren erfasst und verglichen werden muss. Dem minimalen messtechnischen und Datenerfassungsaufwand stehen umfangreiche statistische Analysen gegenüber, um die nötigen Kennzahlen erstellen zu können.

Anforderung an Messtechnik

Die Strommessung erfolgt in den meisten Fällen mittels einfach zu installierender Stromzangen. Zur Spannungsmessung sind jedoch im Allgemeinen eine Unterbrechung der Stromversorgung und der Anschluss durch eine autorisierte Elektrofachkraft erforderlich, was sich an Maschinen im industriellen Einsatz oft als schwierig

erweist. Befindet sich im gleichen Stromkreis (Unterverteilung) der zu untersuchende Anlage eine CEE-Steckdose, kann der Spannungsabgriff für die Wirkleistungsmessung der Gesamtmaschine - und hinreichend genau für Hilfssysteme – alternativ an dieser erfolgen, da in einem Stromkreis die Spannung an jeder Stelle (annähernd) gleich ist. Innerhalb von [31] wurde deshalb ein Messkoffer zum einfachen, unterbrechungsfreien Spannungsabgriff entwickelt und hergestellt. Neben den notwendigen Sicherheitseinrichtungen (Sicherheitsbuchsen und FI-Schalter für Messspannungen) enthält er einen kapazitiv wirkenden, berührungslosen Sensor zum Abgleich der Phasenlage der unterschiedlichen Messstellen für Spannung und Strom. Dieses Equipment ermöglicht es, Messungen ohne langwieriges Abschalten von Produktionsanlagen und ggf. sogar ohne Elektrofachkraft durchführen zu können.

Sind darüber hinaus mehrere Einzelkomponenten (Haupt-, Neben- und Hilfsantriebe) zeitgleich zu messen, um deren Zusammenwirken im System WzM zu untersuchen, stehen spezielle elektrische Messwandler (erhöhter Installationsaufwand) zur Verfügung. Die Leistungsberechnung und Datensicherung erfolgt je nach Anforderung (Genauigkeit, Messzeitraum) mittels entsprechender Leistungsanalytoren oder PXI-Messkarten und Software (Eigenentwicklung auf LabVIEW-Basis). Die vorhandenen, mobil einsetzbaren Messsysteme ermöglichen sowohl spezielle, hochauflösende (kleiner 1 ms), Leistungsmessungen verschiedener Verbraucher (u. a. auch im Servo-Antriebsverband) im Versuchsfeld als auch Langzeitmessungen der Gesamtenergieaufnahme über Wochen an Maschinen im Produktionseinsatz (Auflösung 1...3 s).

3.4 Bewertung durch Vergleich

Systematisierung der Einflussgrößen auf den Energieverbrauch

Alle gemessenen oder ermittelten Daten werden in einer Datenbank abgelegt. Auch die Einbeziehung von Werten aus der Literatur trägt zum Aufbau eines statistisch belastbaren Datenpools bei. Neben den gemessenen Energieverbräuchen in den verschiedenen Betriebszuständen werden möglichst viele Randbedingungen und Maschinenspezifikationen erfasst, die im ersten Schritt wie folgt gegliedert bzw. systematisiert werden:

- Allgemeines (Maschinentyp, Baujahr, Fertigungsverfahren)
- Größe (Gewichte und Abmaße für Maschine, Werkstücke, Arbeitsraum)

- Qualität (Positioniergenauigkeit, Fertigungsgenauigkeit, Steifigkeit)
- Dynamik (Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Ruck)
- Hilfssysteme (KSS, MMS, Automatisierungseinrichtungen)
- Umweltbedingungen (Energieformen und -qualität, Hallenklima)

Die Angaben Dynamik und Hilfssysteme sind dabei ein Indikator für die Produktivität der Maschine und könnten ggf. unter diesem Begriff weiter zusammengefasst werden.

Statistische Korrelationsanalysen

Mittels statistischer Korrelationsanalysen kann nun die Signifikanz einzelner Einflussgrößen für den Energieverbrauch aufgezeigt werden. Der Fokus liegt dabei wie erwähnt auf eine hohe Aussagekraft mit minimalem Datenerfassungs- bzw. Messaufwand zu gewährleisten. Es soll hierbei keine Bewertung einzelner Komponenten erfolgen.

Normierung des Energieverbrauchs

Untersuchungen in [32] zeigten, dass beispielsweise das Gewicht von Werkzeugmaschinen exponentiell mit deren installierter Leistung zunimmt, wobei für Horizontal Drehmaschinen näherungsweise ein quadratischer Zusammenhang gefunden wurde. Des Weiteren wird in [33] als Kennwert zur Beurteilung der statischen und dynamischen Eigenschaften von WzM eine bezogene Steifigkeit unter Berücksichtigung der Maschinengröße (quadratischer Mittelwert von Bewegungsachsen) und der Antriebsleistung ermittelt. Das Ergebnis ist eine normierte, relative Steifigkeit in $[N/(\mu\text{m}\cdot\text{m})]$ bzw. $[N/(\mu\text{m}\cdot\text{kW})]$, welche bei entsprechend großer Anzahl an Untersuchungsergebnissen einen herstellerunabhängigen Maschinenvergleich hinsichtlich des Standes der Technik in Bezug auf die Steifigkeit erlaubt. Es gibt demnach Zusammenhänge, die es ermöglichen, durch numerische Verfahren für bestimmte Parameter Korrekturwerte zu finden, die z. B. den Vergleich unterschiedlich großer WzM erlauben.

Vergleich anhand normierter Größen

Nach [33] können Maschinen als vergleichbar angesehen werden, sofern ihre Bauform den gleichen Typ von Bearbeitungsaufgabe ermöglicht, bspw. Drehen oder Fräsen. Dies entspricht der Klassifizierung der Produktgruppe, wie sie für Energie-labels erforderlich ist. Um den Einfluss der Eigenschaften von Maschinen einer Klasse auf deren Energiebedarf zu relativieren, ist eine Bezugsgröße erforderlich,

die die absoluten Werte zu relativen Werten normiert. In Anlehnung an [33] muss die Bezugsgröße dabei verschiedenen Anforderungen genügen:

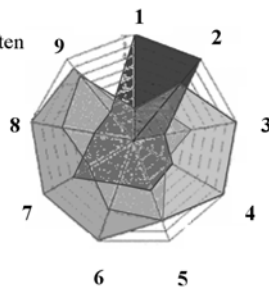
- sie muss transparent, d.h. für den Betrachter nachvollziehbar sein.
- sie muss aus Praktikabilitätsgründen leicht aus den Daten der Maschine zu ermitteln sein.
- sie muss Kennwerte verschiedener Maschinen eines Typs, die z. B. für unterschiedlich große Werkstücke geeignet sind, vergleichbar machen. Die Bezugsgröße von Maschinen für vergleichbare Bearbeitungsaufgaben muss in etwa gleich groß sein.

Aus den normierten Größen können bspw. durch Multiplikation mit Korrekturfaktoren normierte Kennzahlen ermittelt werden. Für den hier beschriebenen Ansatz zeigt das Bild 9 eine Sterngrafik. Dabei wurden Kennwerte angenommen, um den methodischen Vergleich anschaulicher zu gestalten.

CNC Fräs-BAZ ABC

1. technische Eigenschaften
2. Technologie
3. Qualität
4. Produktivität
5. Flexibilität
6. Umwelt
7. Schruppen
8. Schlichten
9. Feinbearbeitung

Erstellt: 03/2012



WZM ABC
 WZM UVW
 WZM XYZ

Zeitspanvolumen	300cm ³ /min
Standby	0,5 kW
Fertigungsbereit	1,4 kW
Fertigung 25%	1,9 kW
Fertigung 100%	3,0 kW

Bild 9: Prinzip der Sterngrafik zum Vergleich von Werkzeugmaschinen

Für diese Darstellungsform ist eine Begrenzung der normierten Kennwerte z. B. zwischen 0 und 1 (oder 0 ... 100 %) sinnvoll, wofür jeweils eine geeignete Bezugsgröße (Stand der Technik zu bestimmtem Zeitpunkt). Gelingt es zudem, praktisch nicht erreichbare Bezugsgrößen, vergleichbar der theoretisch notwendigen, spezifischen Schmelzenergie beim Spritzgießen, zu finden, entgeht man dem Problem der zeitlich begrenzten Gültigkeit. Ziel sollte ein Energieeffizienzindex (EEI) ähnlich dem Wirkungsgrad sein.

Bezugsgröße

Eine für spanende WzM typische Größe, welche bereits von einigen Herstellern für ihre Maschinen angegeben wird, ist das Zeitspanvolumen Q [34]. Nach Gleichung 3

fließen darin die Werkstückwerkstoffe über die spezifische Schnittkraft k_c und Fertigungsverfahren über Korrekturfaktoren K und in den theoretischen, spezifischen Energieaufwand E_{c_th} beim Spanen ein [35]:

$$E_{c_th} = \frac{P_c}{Q} = k_c \prod K \quad (3)$$

Die spezifische Schnittkraft k_c hängt neben dem Werkstoff primär von der Spannungsdicke h ab. Der spezifische Energieaufwand nimmt dadurch degressiv mit abnehmender Spannungsdicke zu, was eine weitere Einteilung in Schrupp-, Schlicht- und Feinbearbeitung erfordert [35]. Die Schnittleistung P_c beinhaltet über den hauptspindel-spezifischen Werkstück- (Drehen) bzw. Werkzeugdurchmesser (Fräsen, Bohren, Schleifen) die Parameter Drehzahl und Schnittmoment, welche von der Hauptspindel bereitgestellt werden müssen. Somit kann aus den Eigenschaften Nennleistung, Nenn Drehzahl und Nennmoment der Hauptspindel für einen typischen Vertreter einer Werkstückwerkstoff-Klasse (z. B. C45 für Stahl) ein theoretisch mögliches Zeitspanvolumen und dessen Energieaufwand berechnet werden. Die Auswahl der Werkstückwerkstoff-Klasse richtet sich nach dem vorgesehenen Einsatzgebiet der Maschine. Der so erhaltene Wert mit der Einheit [W/(cm³/min)] (oder umgerechnet in [J/cm³]) wird mit einem zu messenden realen Prozess bei gleichem Zeitspanvolumen auf der Maschine verglichen. Die Verhältniszahl aus theoretischem und Messwert bildet den dimensionslosen Energieeffizienzindex EEI für die Bearbeitungsaufgaben Schruppen, Schlichten und Feinbearbeitung, der mit den normierten Einflussfaktoren korrigiert wird.

Kühlschmiermittelzuführung (Prozessstabilität) und Automatisierungseinrichtungen (Verkürzung von Nebenzeiten) als zusätzliche Verbraucher verschlechtern die Leistungsbilanz, verbessern aber die Gesamtenergiebilanz eines Fertigungszyklus. Deren Einbeziehung ist mit Hilfe definierter Bewegungsprofile ähnlich der vorgestellten Effizienz Zahl EE [20] denkbar, wobei aus erfassten Einflussgrößen der jeweiligen Testzyklen klar begründbare Bewertungskriterien abgeleitet werden müssen. Luftabsaugungen „drücken“ ebenfalls auf die Energiebilanz, heben aber die Umwelteigenschaften (Luftqualität, KSS-Rückgewinnung) und müssen ebenfalls auf geeignete Weise Berücksichtigung finden.

Neben vergleichenden, normierten Werten bringen zusätzlich absolute Messdaten dem Nutzer mehr Klarheit. Die Leistungsangabe für verschiedene Betriebszustände anstelle eines Energieverbrauchs ermöglicht dem Anwender, den Energiebedarf für den beabsichtigten Einsatzfall abzuschätzen. Zusätzliche Anhaltspunkte könnten

z. B. Aussagen zu Art und Leistungen der installierten Kühlschmierstoffpumpen geben.

4 Zusammenfassung

Der von der Europäischen Union geforderte Nachweis der Umweltverträglichkeit für energiegetriebene Produkte wird perspektivisch auch ein Energielabel für WzM erfordern, welches der Inhomogenität und Vielfältigkeit dieser Produktgruppe gerecht werden muss. Vor diesem Hintergrund wurden Normen und Fallbeispiele für existierende Energielabel und -kennzahlen aufgezeigt und deren Ansätze hinsichtlich ableitbarer Methoden für WzM diskutiert. Dabei konnte herausgearbeitet werden, dass der Einsatzfall klar definierbar sein muss, was bei WzM nur mit weitestgehend prozessunabhängigen Kriterien möglich ist. Diese Kriterien sollten im Sinne einer guten Transparenz mit verhältnismäßig geringem Aufwand auch in Industrieunternehmen ermittelbar sein. Der Ansatz für die Bewertungsmethode beruht auf der Auswertung sowohl messtechnisch erfasster Kennwerte als auch die WzM kennzeichnenden Parametern. Dafür wurde ein mobiles Messsystem entwickelt, welches vor allem auf die Messung elektrischer Energie als wichtigste Energieform abzielt. Des Weiteren wurde das Vorgehen beschrieben, mit dessen Hilfe die signifikanten Einflussgrößen auf den Energiebedarf von WzM mittels statistischer Methoden ermittelt werden, um den Aufwand für Datenbeschaffung und Messung zu minimieren. Mit Hilfe einer zu entwickelnden Methodik sind diese signifikanten Einflussgrößen, zu klassifizieren, zu wichten und als Einflussfaktoren für den Energieeffizienzindex EEI zu normieren. Die vorgeschlagene Bezugsgröße spezifischer Energieaufwand basiert auf dem Zeitspanvolumen und wird für 3 Bearbeitungsaufgaben angegeben. Forschungsbedarf besteht vor allem bei der Einbeziehung von Umwelt-, Prozesskonditionierungs- und Automatisierungskomponenten. Durch das Zusammenführen aller Parameter auf die Vergleichsgrößen des EEI kann für die jeweiligen Maschinenklassen ein spezifischer, normierter Energiebedarf ausgewiesen werden, der als eine Kenngröße für ein Energielabel dient. Diese Kenngröße ermöglicht dann aufgrund ihrer breiten Anwendbarkeit eine vergleichende energetische Bewertung unterschiedlicher WzM.

Literatur

- [1] *DIRECTIVE 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products; Official Journal of the European Union; L 285/10.*
- [2] *EN ISO14020: Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Allgemeine Grundsätze; Deutsche Fassung EN ISO14020:2001. Beuth Verlag, Berlin, 2008*
- [3] *Altmann, E.: Energie-Effizienz - Wettlauf der Maschinenbauer, Interview mit Dr.-Ing. Masahiko Mori, Präsident Mori Seiki Co. Ltd. Produktion, Nr. 45, 2008, S. 8*
- [4] *CECIMO: Concept Description for CECIMO's Self-Regulatory Initiative (SRI) for the Sector Specific Implementation of the Directive 2005/32/EC (ErP Directive), 2009*
- [5] *Hagemann, D., 2011. Status of ISO/TC39/WG12, 2nd Stakeholder Meeting Lot 5 ErP, Frankfurt a.M.: <http://www.ecomachinetools.eu/typo/meetings.html>, am 15.02.2012*
- [6] *VDI 4661: Energiebegriffe und Kennzahlen. Beuth Verlag, Berlin, 2003*
- [7] *N.N.: Niederspannungs-Asynchronmotoren nach neuem Wirkungsgradstandard und neuen Effizienzklassen. www.industry.siemens.com, am 15.02.2012*
- [8] *<http://www.stroeffizienz.de/eu-label/neues-eu-label.html>, am 15.02.2012*
- [9] *Stulgies, S.: Energielabel und Darstellung der Messmethoden für Kühl- und Gefriergeräte. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Landtechnik, Sektion Haushalttechnik, http://www.haushaltstechnik.uni-bonn.de/energylabel/PP_Kuehlschraenke.pdf, am 15.02.2012*
- [10] *Stulgies, S.: Energielabel und Darstellung der Messmethoden für Haushaltsgeschirrspüler. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Institut für Landtechnik, Sektion Haushalttechnik, http://www.haushaltstechnik.uni-bonn.de/energylabel/PP_Kuehlschraenke.pdf, am 15.02.2012*
- [11] *N.N.: Verkehrsclub Deutschland VCD, <http://www.vcd.org/co2-label.html>, am 15.02.2012*

- [12] Deppe, A.: *Energieausweis für Nichtwohngebäude - Herausforderung und Chance für Kommunen*. bei: dena-Dialog kommuna, Potsdam, 2008, http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Veranstaltungen/2008/09/BAU/Deppe.pdf, am 15.02.2012
- [13] Neugebauer, R.; Richter, C.; Fischer, S.: *Energetische Wechselwirkungen zwischen Prozess und Gebäude*. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, Carl Hanser Verlag, München, 9/2011, S. 591-595
- [14] N.N., Sächsischen Energieagentur SAENA GmbH: *Analyse und Bewertung*: http://www.gewerbeenergiepass.de/SaeGEP/Was-ist-der-SeGEP/Analyse_und_bewertung.html, am 15.02.2012
- [15] Pamminer, R.; Wimmer, W.; Winkler, R.: *Entwicklung von Kriterien zur Kommunikation der Energieeffizienz von Kunststoff verarbeitenden Maschinen*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 5/2010
- [16] N. N.: *Siemens: Projektierungshandbuch, PFT6, Ausgabe 12/2004, Synchronmotoren 1FT6*
- [17] Draganescu, F.; Gheorghe, M.; Doicin, C.V.: *Models of machine tool efficiency and specific consumed energy*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, 2003, S. 11.
- [18] Frieß, U.; Wabner, M.; Lütz, N.: *Aspekte der Energieeffizienz von Vorschubantrieben in Werkzeugmaschinen*. In: wt Werkstattstechnik online, Springer-VDI-Verlag, 5/2011, S. 353-362
- [19] Neugebauer, R.; Wabner, M.; Rentzsch, H., Ihlenfeldt, S.: *Structure principles of energy efficient machine tool*. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 4/2011, pp. 136-147
- [20] Kaufeld, M.: *Energieeffizienz-Kennziffer für Maschinensysteme - Eine Möglichkeit des Maschinenvergleich*. In: WB Werkstatt + Betrieb, Carl Hanser Verlag, München, 12/2011, S. 60-64
- [21] Dietmair, A.; Verl, A.: *Energy Consumption Forecasting and Optimisation for Tool Machines*, Modern Machinery (MM) Science Journal, Prague, Bd. 2009, Nr.1, Paper 4.
- [22] Dervisopoulos, M.: *CO\$TRA - Life Cycle Costs Transparent*. Abschlussbericht, Darmstadt, 2008, Seite 27, <http://www.stiftung-industrieforschung.de/Schwerpunkt-Life-Cycle/mit-qcotraq-lebenszykluskosten-berechnen>, am 15.02.2012

- [23] Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.: *Energetisch-wirtschaftliche Bewertung von Werkzeugmaschinen – Methodik und beispielhafte Anwendung*. In: Müller, E.; Spanner-Ulmer, B. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit in Fabrikplanung und Fabrikbetrieb - Tagungsband zu 14. Tage des Betriebs- und Systemingenieurs - TBI '11*, Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme, Chemnitz 2011, S. 121-134
- [24] Enparantza, R.; Revilla, O.; Azkarate, A.; Zendoia, J.: *A Life Cycle Cost Calculation and Management System for Machine Tools*. In: *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2006*
- [25] Abele, E.; Kuhrke, B.; Rothenbücher, S.: *Entwicklungstrends zur Erhöhung und Bewertung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen*. In: Neugebauer, R.: *Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik – Tagungsband zum 1. Internationalen Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Chemnitz, 2010, S. 99-120, <http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/DokumentDownload.php>, am 15.02.2012
- [26] Dietmair, A.; Verl, A.: *Energieeffizienter Betrieb von Produktionsanlagen*. In: Neugebauer, R.: *Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik – Tagungsband zum 1. Internationalen Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Chemnitz, 2010, S. 185-206, <http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/DokumentDownload.php> am 15.02.2012
- [27] Abele, E.; Schrems, S.; Schraml, P.: *Energieeffizienz in der Fertigungsplanung - Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung*. In: *wt Werkstattstechnik online*, Springer-VDI-Verlag, 1-2/2011, S. 38-40
- [28] Brecher, C.; Herfs, W.; Heyers, C.; Klein, W.; Triebs, J.; Beck, E.; Dorn, T.: *Ressourceneffizienz von Werkzeugmaschinen im Fokus der Forschung*. In: *wt Werkstattstechnik online*, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2010, S. 559-564
- [29] Hirsch, A.: *Werkzeugmaschinen Grundlagen*, Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 2000, S. 109
- [30] Brecher, C.; Boos, W.; Klein, W.; Kuhlmann, K.; Triebs, J.: *Ressourceneffizienzbewertung einer Werkzeugmaschine zur Steigerung ihrer Wirtschaftlichkeit*. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF*, Carl Hanser Verlag, München, 9/2009, S. 711-715

- [31] Paetzold, J.: *Messung elektrischer Energie – Grundlagen und Erfahrungen*. In: Neugebauer, R.; Götze, U.; Drossel, W.-G. (Hrsg.): *Methoden der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung in der Produktionstechnik. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD*, Verlag Wissenschaftliche Scripten, Auerbach, 2011, S. 35-53, <http://www.eniprod.tu-chemnitz.de/DokumentDownload.php>, am 15.02.2012
- [32] Bongard, M.; Jufer, M.: *Analyse du rendement énergétique de processus industriels de productique*. Publications RAVEL, Office fédéral des questions conjoncturelles, 1992
- [33] Weck, M.; Brecher, C.: *Werkzeugmaschinen 5 - Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006, S. 310 ff., 343ff.
- [34] Gutowski, T.; Dahmus, J.; Thiriez, A.: *Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes*. *Proceedings of 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2006, pp. 623-627
- [35] Degner W.; Lutze H.; Smejkal E.: *Spanende Formung*. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2002, S. 105-111