

Untersuchungen zur Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der kinematischen Struktur und der Prozesskräfte

Christoph Dorn; Matthias Stark; Ulrich Renger; Friedrich Bleicher, Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik

Zusammenfassung

Über Jahrzehnte hinweg galt die Produktivitätssteigerung in den Fertigungsprozessen als die oberste Zielsetzung produktionstechnischer Optimierungsstrategien. Speziell in der metallverarbeitenden Industrie steht in jüngster Vergangenheit die Werkzeugmaschine vermehrt im Fokus der Betrachtungen zur Optimierung und Steigerung der Energieeffizienz. Unter den Technologien der spanenden, abtragenden, zerteilenden und umformenden Fertigung nimmt hierbei in erster Linie der Einsatz spanender Werkzeugmaschinen eine herausragende Rolle ein. Aus diesem Grund untersucht das Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik (IFT) der Technischen Universität Wien (TU Wien) den effizienten Energieeinsatz von Werkzeugmaschinen beim Zerspanprozess. Aktuell laufen am IFT zum Thema ressourcenschonende Produktion zwei Forschungsprojekte mit insgesamt 23 Industriepartnern aus unterschiedlichen Branchen. Das Forschungsprojekt „Eco2Cut“ ist mit Forschungseinrichtungen aus Belgien und Deutschland international aufgestellt und befasst sich mit ökologischen und ökonomischen Aspekten bezüglich Maschine, Material und Prozess. Im nationalen Forschungsprojekt „Interdisziplinäre Forschung zur Energieoptimierung in Fertigungsbetrieben“ steht die energieeffiziente Interaktion der Maschine mit der Gebäudetechnik im Vordergrund.

Das energetische Optimierungspotenzial von Werkzeugmaschinen lässt sich über den Wirkungsgrad bewerten. Laut aktuellen Forschungsergebnissen werden lediglich 5% bis 25% der Primärenergie von Bearbeitungszentren für die Spanbildung aufgewendet. Die restliche Energie teilt sich auf in Verlustleistungen, wie zum Beispiel Reibung und Abwärme. Die Werkzeugmaschine wird dabei als geschlossenes System angesehen, in welchem Material in Form von Rohteilen und Werkzeugen unter Anwendung von Energie und Bearbeitungsinformationen eine Wertschöpfung in Form der Fertigteile realisiert. Vor diesem Hintergrund zählen Nebenprodukte wie Späne und Ausschuss aufgrund von mangelnder Geometrietreue sowie Abwärme zu nicht wertschöpfenden und aus diesem Grund zu vermeidenden Größen. Gerade bei komplexen Systemen wie einer Werkzeugmaschine und einem spanenden Prozess ist der Wirkungsgrad jedoch von vielen einzelnen Einflussgrößen und auch deren Kombination abhängig. Um den Wirkungsgrad zu optimieren, ist einerseits das Verständnis zur Maschine und zu deren Auslegung sowie andererseits zum Prozess notwendig.

Der vorliegende Beitrag zeigt Ansätze für die Steigerung der Energieeffizienz, wobei besonderes ein Augenmerk auf den Bearbeitungsprozess sowie auf die Auslegung der Werkzeugmaschinen gelegt wird. Eingangs werden die bei Werkzeugmaschinen vorwiegend eingesetzten Maßnahmen zur Effizienzsteigerung vorgestellt. Im Folgenden werden zwei Möglichkeiten zur Reduzierung der Leistungsaufnahme bei der Betriebsbereitschaft sowie bei der Bearbeitung erläutert. Die hierbei vorgestellten Ansätze zur Effizienzsteigerung wurden am IFT im Rahmen von Versuchen näher analysiert. Hierzu wurde eigens eine mobile Messeinrichtung entwickelt, mit welcher - bis auf den

Hydraulik-Volumenstrom - alle bei Werkzeugmaschinen relevanten Energieträger unter ökologischen und ökonomischen Aspekten untersucht werden können. Für die Messung der Wirk- und Blindleistung lassen sich mit einer entsprechenden Abtastrate von 40ms zeitkritische Prozesse wie Spindelhochläufe und Beschleunigungsrampen abbilden. Neben der Erfassung des elektrischen Stroms und der Spannung wird der Durchfluss der Druckluft und des Kühlschmierstoffs aufgenommen.

Die Bewertung der Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine hat anwendungsspezifisch zu erfolgen und verlangt die Kenntnis des tatsächlichen Nutzungsprofils der Maschine. Am IFT wurde die Energieeffizienz zweier Maschinen mit unterschiedlicher Strukturkomplexität jedoch mit vergleichbarem Bearbeitungsvermögen analysiert und bewertet. Die Bewertung erfolgte aufgrund eines speziell entwickelten Energieeffizienzfaktors, der in Abhängigkeit der Grundlast und der eigentlichen Prozesslast, zwei unterschiedliche Maschinen miteinander vergleichbar macht. In der besagten Vergleichsstudie wurde gezeigt, dass die Energieeffizienz zweier zu vergleichenden Maschinen anhand einer Kennzahl dargestellt werden kann. Diese Kennzahl soll bei zukünftigen Untersuchungen die Grundlage für eine objektive Maschinenbewertung bieten und in weiterer Folge zur besseren Bewertung unterschiedlicher Investitionsalternativen beitragen. Der Einsatz einer Kennzahl für die Energieeffizienz erweist sich zum Beispiel gerade in der Losgrößenfertigung mit auftragspezifisch stark veränderlichen Lastkollektiven von großem Wert für die energetische Optimierung.

1 Einleitung

Die steigenden Energiekosten und das Abnehmen verfügbarer Ressourcen haben das Bewusstsein für eine nachhaltige und auch emissionsfreie Ressourcennutzung geschaffen. Aufbauend auf dem Kyoto-Protokoll von 1997 wurden in der EU-Richtlinie 2006/32/EG für alle EU-Mitgliedsstaaten das Ziel festgesetzt, bis zum Jahr 2016 den jeweiligen nationalen Energieverbrauch in Höhe von 9% des durchschnittlichen Energieverbrauchs der Jahre 2001 bis 2006 einzusparen [1]. Der gesamte Energieverbrauch kann dabei grob auf die Bereiche Privathaushalte, Verkehr/Mobilität und die Industrie/Produktion dreigeteilt werden. Dadurch steigt der Druck der Öffentlichkeit, z.B. den CO₂-Ausstoß von Kraftfahrzeugen zu minimieren und die Thematik der nachhaltigen Verbesserung der Energieeffizienz in der Fertigung weiter zu etablieren. Mit der 2005 in Kraft getretenen und 2009 erweiterten Ökodesign-Richtlinie rückte die ressourcenschonende Produktion mit der Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte wie auch die Werkzeugmaschine selbst in den Vordergrund der Energieeffizienz-Thematik [2].

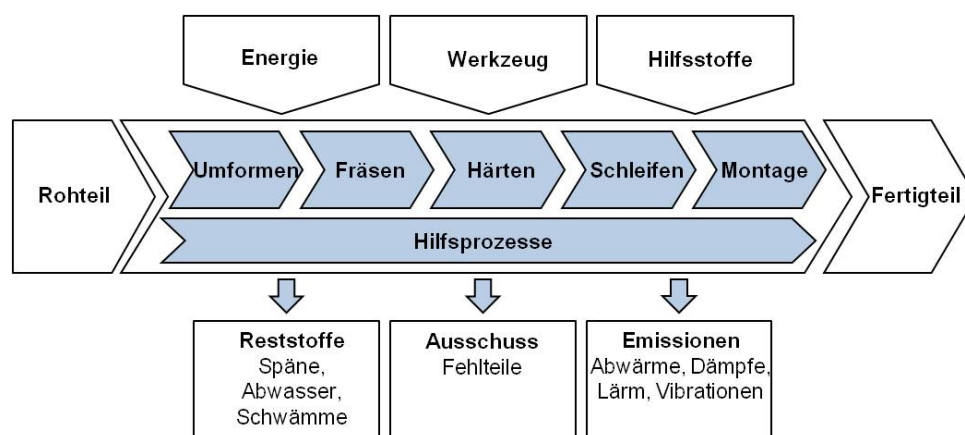


Abbildung 1: Energieeffizienz entlang der Fertigungskette [3]

Die Steigerung der Energieeffizienz in der Fertigung umfasst die eingehende Betrachtung von Prozessschritten entlang der gesamten Fertigungskette (Abbildung 1). Die bestehenden Ansätze können dabei in die Bereiche Maschinenauslegung, Prozessgestaltung und eingesetzte Materialien eingeteilt werden. Im Bereich der Maschinenauslegung wird zum Beispiel der Einsatz alternativer Führungselemente und Antriebssysteme oder der Leichtbau von Maschinenelementen betrieben, um die für deren Bewegung notwendige Energie zu reduzieren. In Hinblick auf das zu produzierende Werkstück wird oftmals über die Near-Netshape-Technologie versucht, durch die Erstellung Endgeometrie naher Rohteile das abzuspannende Volumen gering zu halten. Des Weiteren führt der Einsatz von energieeffizienten Komponenten, wie Pumpen und Kühlaggregate, zu geringeren Leistungsaufnahmen. Prozesstechnisch trägt die Kombination verschiedener Verfahren in einem Bearbeitungszentrum zu einer Verkürzung der Prozessketten mit entsprechender Steigerung der Energieeffizienz bei, wie zum Beispiel die Kombination aus Drei-Achs-Fräsen und Laserbearbeitung. In der Werkzeugtechnik führt die Verwendung von modernen Schneidstoffen zu geringeren Reibungsverlusten und Verschleiß und somit zu einer effizienteren Ausnutzung der Schnittleistung. Letztlich lassen sich durch die Umstellung von Nass- auf Trockenbearbeitung umweltschädliche Kühlschmierstoffe und die damit verbundenen Ausschleppverluste vermeiden [3], [4].

2 Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung

Die Entwicklung effizienzsteigernder Maßnahmen setzt die Kenntnis der im System Werkzeugmaschine eingebrachten Energieformen voraus. Seitens des Herstellers besteht oftmals nur bedingt Transparenz bezüglich der Verteilung des Energieverbrauchs der installierten Komponenten. So geben zum Beispiel Angaben zur Anschluss- und Spindelleistung dem Betreiber keinen festen Anhaltspunkt zur Bewertung der Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine. Tatsächlich konzentrieren sich Forschungsinstitute und Maschinenhersteller seit kurzer Zeit darauf, den Fertigungsprozess - angefangen vom Rohteil über die Werkzeugmaschine bis zum Fertigteil - detailliert zu betrachten. Die Bewertung des Energieverbrauchs und der damit verbundenen Kosten zeigt dabei, dass letztlich die größten Einsparpotenziale aller an einem Bearbeitungsprozess beteiligten Verbräuche bei der elektrischen Energie zu erzielen sind (Abbildung 2).

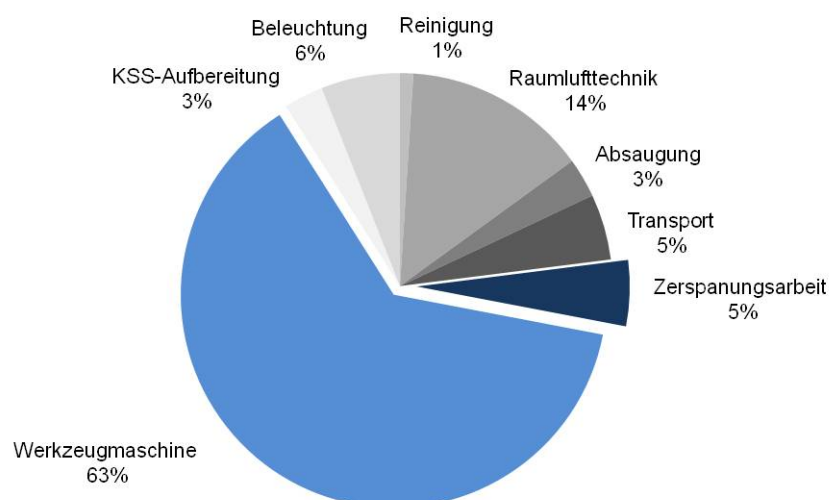


Abbildung 2: Exemplarische energetische Kostenverteilung eines Bearbeitungszentrums [4]

Die Optimierung des Energieeinsatzes geschieht stets im Spannungsfeld der Eigenschaften von Werkzeugmaschinen. Zu diesen Eigenschaften zählen die mechanischen Struktureigenschaften,

welche insbesondere das Leistungsvermögen, die Arbeitsgenauigkeit, die Zuverlässigkeit, sowie das Umweltverhalten bestimmen (Abbildung 3). Die energetische Betrachtung von Werkzeugmaschinen zielt in erster Linie auf eine nähere Untersuchung von deren Interaktion mit der Umwelt ab. Der enge Zusammenhang der vier Eigenschaftsbereiche untereinander erfordert jedoch bei jeder Optimierung die Beachtung der entsprechenden Wechselwirkungen. So bewirkt zum Beispiel bei der Maschinenkonstruktion die Reduktion bewegter Massen an der Hauptspindel eine bessere Dynamik sowie eine Verminderung des Energiebedarfs. Eine derartige Strukturoptimierung kann jedoch zum Beispiel aufgrund möglicher Einbußen bei der statischen und dynamischen Steifigkeit oder der installierten Maschinenleistung Auswirkungen auf die Arbeitsgenauigkeit, das Leistungsvermögen sowie die Zuverlässigkeit mit sich bringen.

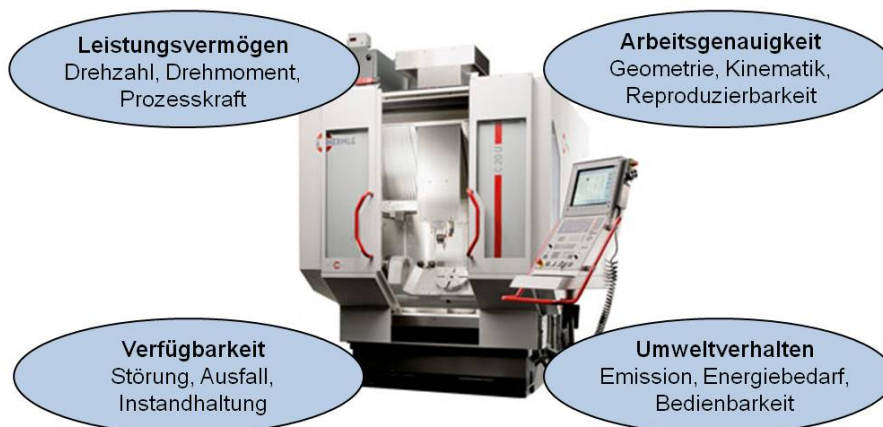


Abbildung 3: Eigenschaften von Werkzeugmaschinen [5]

Die Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz bei Werkzeugmaschinen orientieren sich an der in Abbildung 2 gezeigten Aufteilung der Kostenanteile großer Energieverbraucher. Wie bereits dargestellt, soll insbesondere auf Einsparpotenziale an elektrischer Energie eingegangen werden.

3 Leistungsaufnahme bei Betriebsbereitschaft

Die Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine kann im Wesentlichen unterteilt werden in die Grundleistung, die Leerlaufleistung sowie die Schnittleistung, welche für den eigentlichen Bearbeitungsprozess anfällt. Die Grundleistung ist unabhängig von der Bearbeitungsaufgabe, während die Leerlauf- und Schnittleistung von dieser direkt abhängig sind. Bei den heutigen Werkzeugmaschinen stellt die Grund- und Leerlaufleistung einen größeren Anteil an der gesamten Leistungsaufnahme dar, als die variable Schnittleistung [6]. Die höhere Leistungsaufnahme ist hierbei auf die in den letzten Jahren von den Betreibern geforderte Steigerung der Produktivität zurück zu führen, die mit größer dimensionierten Haupt- und Nebenaggregaten sowie komplexerer Steuerungstechnik einhergegangen ist. Für die am IFT analysierten Maschinen, bei denen Messungen im Leerlauf und während des Zerspanungsprozesses erstellt worden sind, gilt, dass die Schnittleistung in Abhängigkeit des zu zerspanenden Materials gerade einmal 5 bis 25% der Gesamtleistung ausmacht (siehe Abbildung 4).

Für die Reduzierung der Leistungsaufnahme bieten sich Ansätze an, die auf die Auslegung der Strukturkomponenten sowie auf die zeitoptimierte Durchführung der Bearbeitungsaufgabe abzielen. Bei den Nebenaggregaten, wie zum Beispiel der Schaltschrankkühlung, lässt sich der Wirkungsgrad oftmals durch Verbesserungen der Kühlfläche und durch den Einsatz einer Temperaturregelung

steigern. Der Einbau von Durchflusssensoren bei innengekühlten Werkzeugen sorgt für eine effiziente Kühlschmierstoffversorgung und schont die eingesetzten Pumpen.

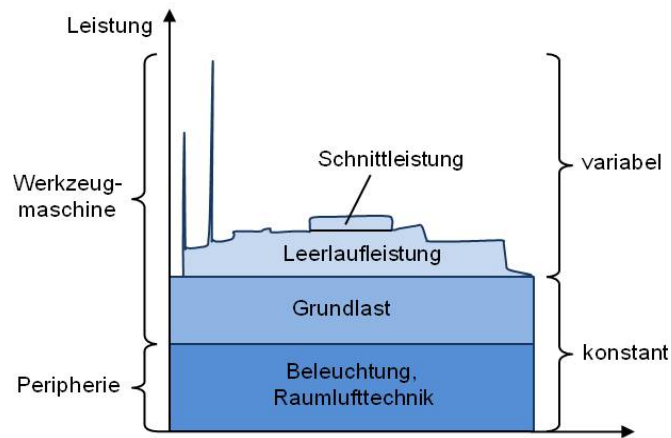


Abbildung 4: Aufteilung der Leistungsaufnahme

In Praxisbeispielen hat sich gezeigt, dass bei verschmutzten Kühlkanälen eine druckgesteuerte Versorgung keine ausreichende Kühlung garantieren kann. Eine zeitoptimale Bearbeitung von Werkstücken lässt sich zum Beispiel durch einen steuerungstechnisch geregelten Standby-Modus, der die Maschine nach längeren Leerlaufzeiten automatisch bis auf die Kompensation thermischer Einflüsse herunterfährt, erreichen. In diesem Zusammenhang steht ebenfalls die High-Speed-Cutting- (HSC-) und die High-Performance-Bearbeitung (HPC-Bearbeitung), die aufgrund der hohen Zerspanleistungen eine Reduzierung der Zykluszeit mit sich bringen.

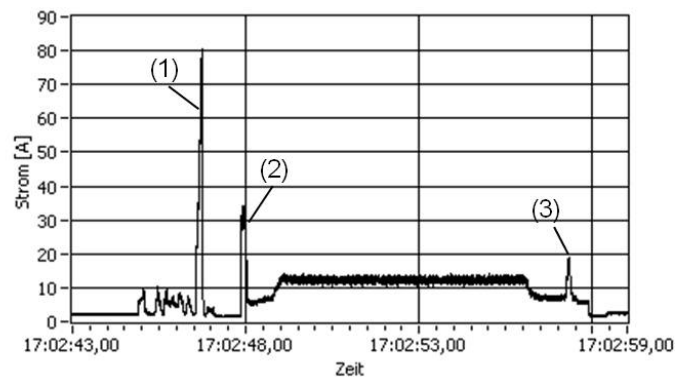


Abbildung 5: Stromspitze beim Spindelhochlauf (1), beim Hochlauf der KSS-Pumpe (2) und beim Z-Rückhub (3)

Dynamische Bearbeitungsvorgänge, welche zum Beispiel beim Achspositionieren oder beim Werkzeugwechsel auftreten, benötigen für kurze Zeiten einen hohen Energieeintrag (Abbildung 5), [7]. Für das Aufbringen dieser Leistungsspitzen sind entsprechend dimensionierte Antriebe erforderlich, deren Betrieb wiederum eine höhere Grundleistung verursacht. Eine optimierte Antriebsauslegung zeichnet sich nicht nur durch die Wahl der Motore aus, sondern zeigt sich auch in der Wahl von Einspeisemodul und Umrichter. Hierbei gilt in der Regel, dass kleinere Module auch kleinere Grundleistungen bzw. Stillstandsverluste verursachen.

Neben der bereits erwähnten Leichtbauweise zur Reduktion der bewegten Massen zielen neue Bemühungen darauf ab, den Gleichzeitigkeitsgrad zu reduzieren, d.h. den Leistungsbedarf bei gleichzeitig ausgeführten Vorgängen wie zum Beispiel dem parallelen Hochfahren der Hauptspindel

bei gleichzeitiger Eilgangbewegung zeitlich versetzt auszurichten. Durch die Verzögerung der Spindelbeschleunigung gegenüber der Beschleunigung der Vorschubantriebe lassen sich kleinere Einspeisemodule verwenden und somit eine geringe Grundleistung erzielen. Eine weitere Reduzierung der Leistungsaufnahme besteht in der Variation der Schnittparameter, wie zum Beispiel die Verringerung der Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit. Untersuchungen haben gezeigt, dass vor allem bei Maschinen, die keine Engpassmaschinen darstellen bzw. die keine Taktrestriktionen bewirken, eine Steigerung der Energieeffizienz durchaus zu Lasten einer Verlängerung der Zykluszeit gerechtfertigt erscheint [3].

4 Energieeinsatz während des Bearbeitungsvorgangs

Zur näheren Untersuchung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen wurde am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik eine Studie erarbeitet, in der unter Berücksichtigung der Maschinenauslegung und der Prozesskräfte eine Energieanalyse durchgeführt werden konnte. In einem ersten Schritt wurde für unterschiedliche Bearbeitungsvorgänge der jeweilige Energieeinsatz einer Werkzeugmaschine messtechnisch erfasst und analysiert. Anschließend konnte in einem zweiten Schritt die Energieeffizienz unterschiedlicher Maschinen, auf denen derselbe Prozess ausgeführt wurde, verglichen und bewertet werden.

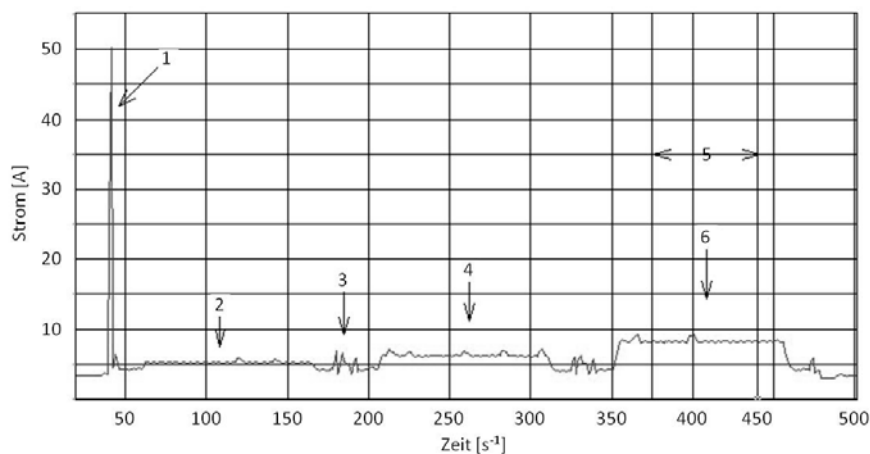


Abbildung 6: Betrachtung der Leistungsaufnahme bei der Fräsbearbeitung, Vorschub in X-Richtung
(Prozessparameter: $a_p = 5\text{mm}$, $v_c = 120\text{m/min}$, $f_z = 0,1\text{mm/Z}$ und $a_e = 2, 4, 8\text{mm}$)

Die Prozesskräfte im Raum des Bearbeitungsprozess wurden unter Einsatz eines Dynamometers aufgezeichnet. Des Weiteren wurde an den Werkzeugmaschinen mittels Stromwandler in Echtzeit die Primärenergie gemessen und der Durchfluss von Druckluft und Kühlschmierstoff bestimmt. In Abbildung 6 ist exemplarisch ein Fräsprozess, bestehend aus Spindelhochlauf (1), Fräsbearbeitungen mit Überdeckung $a_e = 2\text{mm}$, 4mm und 8mm (2-4) sowie Eilgangsbewegungen (6), gezeigt. Zur besseren Veranschaulichung der Leistungsaufnahme abzüglich der Schnittleistung wurde der gleiche Prozess ohne Materialeingriff ausgeführt (Abbildung 7). Das Integral der Fläche über dem Bereich (5) stellt den benötigten Energiebedarf für die Fräsbearbeitung mit 8mm Überdeckung dar.

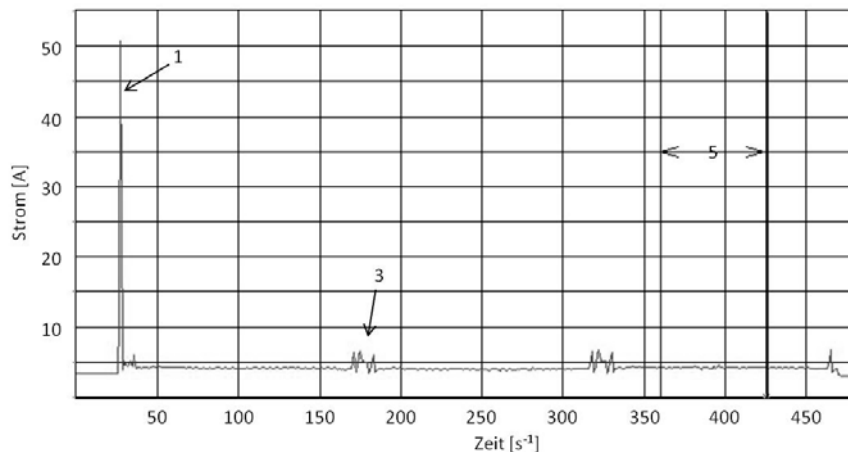


Abbildung 7: Fräsbearbeitungsprozess aus Abbildung 6 ohne Materialeingriff

Das Hochfahren der Hauptspindel verursacht hohe Stromspitzen, wobei die Spindel bei hohen Drehzahlen wie 12.000 U/min in mehreren Schritten beschleunigt wird. Hierbei hat sich gezeigt, dass gerade die Überlagerung der Spindelbeschleunigung mit der Beschleunigung der Vorschubachse sowie mit Sekundärsystemen wie dem Pumpenanlauf für die Vollstrahl- oder Spindelinnenkühlung die höchsten Stromspitzen verursachen. Bezüglich der Achsbewegungen konnte gezeigt werden, dass Haltepositionen bei vertikal ausgeführten Spindelachsen zu einer Erhöhung der Grundlast beitragen und somit einen zusätzlichen Energieverbrauch im Stillstand mit sich bringen. Mit der Erhöhung der Eilgangsgeschwindigkeit geht ebenfalls ein höherer Stromverbrauch einher. Abbildung 8 zeigt dieselbe Bearbeitungsaufgabe mit jeweils unterschiedlichen Eilgangsgeschwindigkeiten. Durch die höhere Verfahrensgeschwindigkeit und Beschleunigung ist hierbei zu erkennen, dass beim Anfahren und beim quasistationären Betrieb der Stromverbrauch zunimmt. Aufgrund der kürzeren Verfahrdauer kann mit der Reduktion der Takrate die Einschaltdauer und somit die Grundlast der Maschine eingeschränkt werden.

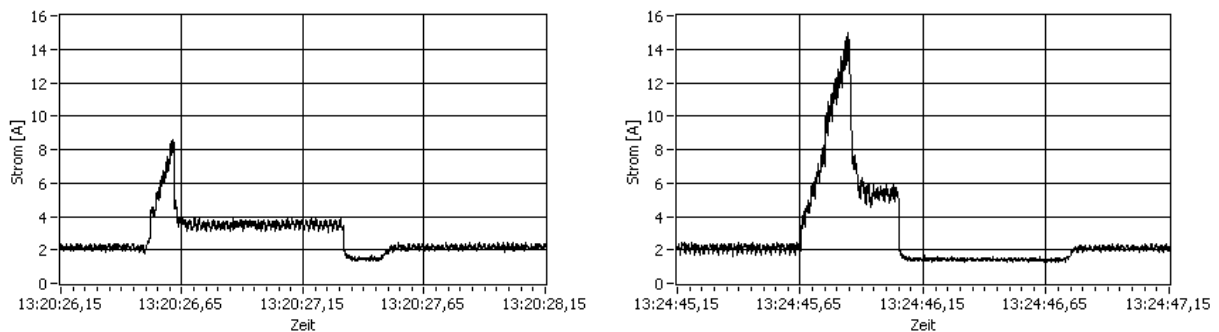


Abbildung 8: Gegenüberstellung der Leistungsaufnahme bei Eilgang = 50% (1) und bei Eilgang = 100% (2)

Hinsichtlich der Nebenaggregate haben Messungen der konventionellen Kühlung im Vergleich zur Spindelinnenkühlung ergeben, dass letztere wegen der größeren eingesetzten Pumpe einen weit höheren Leistungsbedarf erfordern. Eine Vergrößerung des Innendurchmessers in der Spindel von 5mm auf 10mm hat keinen nennenswerten Einfluss auf die Leistungsaufnahme gezeigt. Die Untersuchung des Druckluftverbrauchs zeigte Spitzenverbräuche von bis zu 50l/min auf. Besonders der Betrieb des Werkzeugwechslers erfordert für die pneumatische Verriegelung beim Ein- und Ausspannen des Werkzeugs in die Spindel bzw. in die Magazintasche einen großen Druckluftbedarf.

5 Energetischer Vergleich zweier Werkzeugmaschinen

Der Vergleich der Energieeffizienz zweier Bearbeitungszentren mit unterschiedlicher kinematischer Struktur und Komplexität (dreiachsig oder vierachsig mit Palettenwechseinrichtung) bietet einen Ausgangspunkt für die Entwicklung von Optimierungsansätzen des Systemwirkungsgrads. Diese Gegenüberstellung bietet sowohl für den Hersteller von Werkzeugmaschinen als auch für den Anwender essentielle Erkenntnisse. Vergleichende Messdaten helfen dem Maschinenhersteller bei der Maschinenauslegung unter dem Gesichtspunkt der Energieeffizienz und auch der Anwender kann darin einen Zugang zur Prozessoptimierung ableiten. Zum systematischen Vergleich von Maschinen wurde der Energieeffizienzfaktor $\eta_E(a_e)$ definiert, welcher die Grundlast mit der Prozesslast in Beziehung setzt. Die Grundlast bezieht sich auf die Leistungsaufnahme der Maschine bei betriebsbereitem Zustand. Die Leistungsaufnahme bei Materialeingriff wird mit Prozesslast bezeichnet. Die messtechnisch erfasste Leistungsaufnahme bei Materialeingriff für eine Maschine i über die Zeit t_1 bis t_2 wird mit dem Integral von t_1 bis t_2 der Funktion $f(t)$ und den Indizes i und $load$ bezeichnet. Die Funktion $f(t)$ und den Indizes i und $idle$ bezieht sich auf die Grundlast.

$$\eta_E(a_e) = \left[1 - \frac{\int_{t_1}^{t_2} f(t)_{idle}^i dt}{\int_{t_1}^{t_2} f(t)_{load}^i dt} \right] ab$$

$$a = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f(t)_{idle}^{min} dt}{\int_{t_1}^{t_2} f(t)_{idle}^i dt}, \quad b = \frac{\int_{t_1}^{t_2} f(t)_{load}^{min} dt - \int_{t_1}^{t_2} f(t)_{idle}^{min} dt}{\int_{t_1}^{t_2} f(t)_{load}^i dt - \int_{t_1}^{t_2} f(t)_{idle}^i dt}$$

$$[0 \leq f(t) < \infty, \quad f(t)_{idle} \leq f(t)_{load}]$$

Der Energieeffizienzfaktor wird aufgrund von Verhältnisunterschieden zwischen den unterschiedlichen Lastzuständen der zu vergleichenden Maschinen durch die beiden Korrekturfaktoren a und b ergänzt. Falls der Energieeffizienzfaktor ohne den Korrekturfaktor b berechnet wird, so würde eine Maschine B mit einer höheren Prozesslast im Vergleich zu einer Maschine A mit geringerer Prozesslast eine günstigere Energieeffizienz vorweisen. Mit der Einführung des Faktors b wird allerdings der Einfluss der Grundlast auf die Energieeffizienz in der Betrachtung ausgeklammert. Um dies zu korrigieren, wird ein zusätzlicher Faktor a definiert, mit welchem unterschiedliche Grundlasten bewertet werden können. Beispielhaft soll nun der Energieeffizienzfaktor zweier Haas-Bearbeitungszentren des Typs EC300 und VF3SS berechnet und gegenüber gestellt werden. Als Bearbeitungsaufgabe wurde in dieser Betrachtung eine Planfräsoperation mit den Schnittparametern Eingriffsbreite $a_e = 2, 4, 8mm$, Schnitttiefe $a_p = 5mm$, Vorschub $f_z = 0,1mm/Z$, Schnittgeschwindigkeit $v_c = 120m/min$ herangezogen. Das Testwerkstück bestand aus Stahl mit einer Zugfestigkeit von $R_m = 400N/mm^2$ bis $510N/mm^2$ und einer Dehngrenze von $R_{p,0,2} = 215N/mm^2$. In den Versuchen wurde mit einem VHM-Schafffräser der Firma HOLEX (Art.Nr. 202760, Durchmesser $D = 16mm$) bearbeitet.

Die Abbildung 9 zeigt die auf der Grundlage der Leistungsmessungen ermittelten Energieeffizienzfaktoren über die Eingriffsbreite. Aufgrund der Energieeffizienzkurve der Maschine VF3SS kann von einem niedrigeren Energieverbrauch für den oben beschriebenen Bearbeitungsprozess ausgegangen werden. Der geringere Energieeffizienzfaktor der Maschine EC300 lässt sich darauf zurückführen, dass die Maschine im Vergleich zur Maschine VF3SS über eine vierte Achse und eine Palettenwechseinrichtung verfügt, d.h. es befindet sich eine größere Anzahl an Antrieben in Lageregelung.

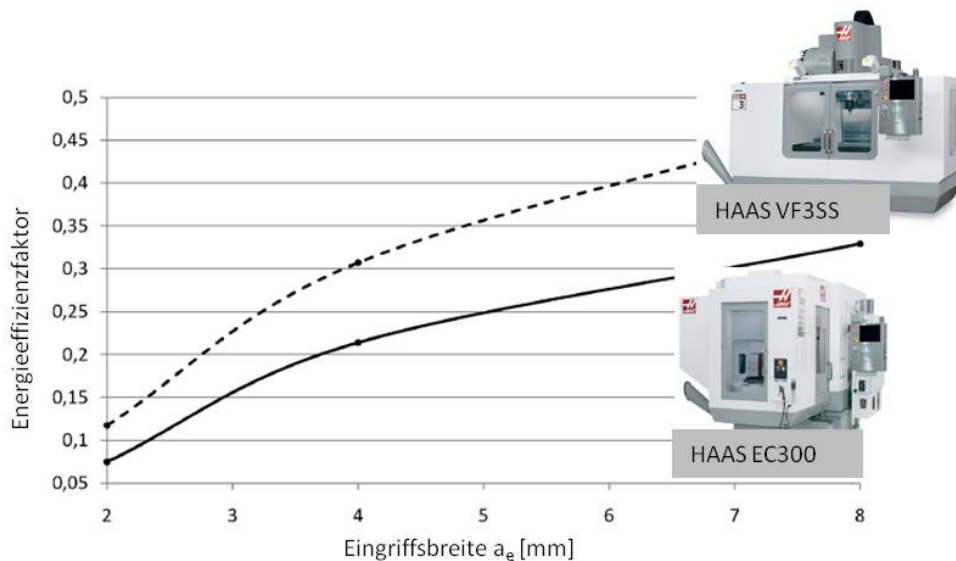


Abbildung 9: Vergleich der Energieeffizienz zweier Bearbeitungszentren

Das Beispiel veranschaulicht, dass eine Überdimensionierung von Maschinen auf der einen Seite zu einer schlechteren energetischen Bewertung führt. Auf der anderen Seite ist zu berücksichtigen, dass die optimierte Auslegung einer Werkzeugmaschine auf eine einzelne Bearbeitungsaufgabe die Flexibilität des Anwenders verringert. Gerade bei der Kleinserienfertigung und bei kurzen Produktlebenszyklen stellt die Wahl der optimalen Maschinenkonfiguration eine Herausforderung an die energieeffiziente Fertigung dar.

6 Literatur

- [1] Richtlinie 2006/32/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Endenergieeffizienz und Energiedienstleistungen (EDL-Richtlinie)
- [2] Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte.
- [3] Fraunhofer Verbund Produktion: Kongress Ressourceneffiziente Produktion. Tagung, Leipzig, 25.2.2009.
- [4] Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW): Die energieeffiziente Werkzeugmaschine, Symposium, METAV Düsseldorf, 24.2.2010.
- [5] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen. Konstruktion und Berechnung. Springer-Verlag, Berlin, 2006
- [6] Dahmus, J. B.; Gutowski, T. G.: An environmental analysis of machining. Proceedings of the IMECE, Anaheim, USA, 2004.
- [7] Bleicher, F.; Dorn, C. & Stark, M. (2009). Performance Analysis of Machine Tools (2009). 1793-1795, Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium, ISBN 978-3- 901509-70-4, ISSN 1726-9679, pp 897, Editor B[ranko] Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2009.