



ENERGIEEFFIZIENZ VON WERKZEUGMASCHINEN

Autoren:

Alexander Steinert - Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Dr.-Ing. Marcel Fey - WZL Aachen GmbH

ENERGIEEFFIZIENZ VON WERKZEUGMASCHINEN

Die Verknappung des Angebots auf dem Markt für Primärenergieträger wie Öl und Gas hat in der Bundesrepublik Deutschland zuletzt, insbesondere im Jahr 2022, zu einem starken Anstieg der Strompreise geführt. Seit 2019 ist der Industriestrompreis (inklusive Stromsteuer) um 44 % gestiegen [1]. Diese drastische und vergleichsweise kurzfristige Entwicklung stellt das produzierende Gewerbe in Deutschland vor große Herausforderungen, weshalb kurzfristige Maßnahmen zur Energieeinsparung einen wertvollen Beitrag zur Stabilisierung der wirtschaftlichen Lage von Unternehmen leisten können.

Werkzeugmaschinen gehören in vielen Unternehmen im Maschinenanbau zu den größten Stromverbrauchern, sodass hier teilweise erhebliche Einsparpotenziale verborgen liegen. Häufig fehlt in Unternehmen allerdings das Erfahrungswissen, um einerseits diese Potenziale zu bewerten und um andererseits die möglichen Auswirkungen möglicher Gegenmaßnahmen auf die Fertigung abzuschätzen. Dieser Beitrag soll die Thematik mit konkreten Zahlenwerten beispielhafter Werkzeugmaschinen beleuchten.

EINFLUSS DER GRUNDLAST

Wird der gesamte Produktlebenszyklus einer Werkzeugmaschine betrachtet, so lag der Anteil der Stromkosten bereits vor dem rasanten Anstieg der Strompreise bei ca. 16,8 % der Gesamtkosten (2019) [2]. Dieser Wert dürfte im Jahr 2022 noch einmal deutlich höher ausfallen. Stromeinsparungen an Werkzeugmaschinen sind also nicht nur ein wichtiger Beitrag zur Steigerung der Nachhaltigkeit der industriellen Fertigung, sondern sorgen gleichzeitig für eine deutliche Entlastung der Unternehmensfinanzen. Der Betrieb einer modernen Werkzeugmaschine ist durch den Einsatz einer Vielzahl an Haupt- und Nebenaggregaten gekennzeichnet. An einem beispielhaften Bearbeitungszentrum wurden am WZL der RWTH Aachen Untersuchungen zur Stromaufnahme der wichtigsten Aggregate durchgeführt, wie Abb. 1 zeigt [3]. Die Hauptspindel, die die für den Fräsprozess notwendige Zerspanleistung bereitstellt, ist in diesem Beispiel für lediglich ungefähr 10 % der elektrischen Leistungsaufnahme verantwortlich.

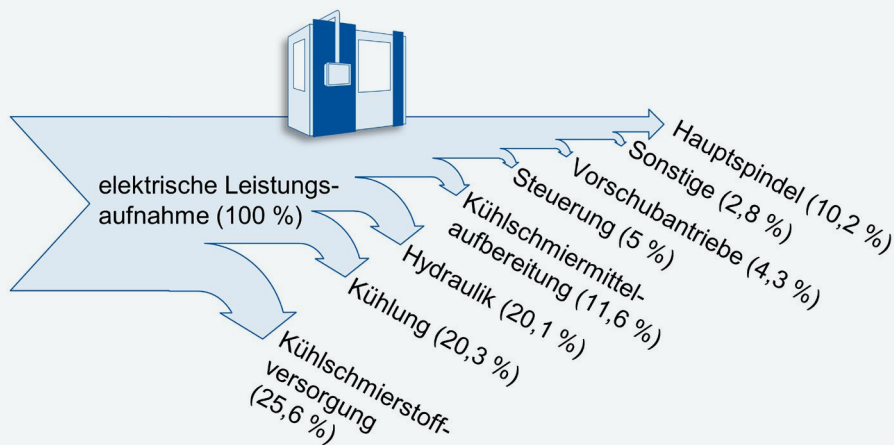


Abb. 1: Elektrische Leistungsaufnahme einzelner Aggregate einer Werkzeugmaschine, angelehnt an [3]

Ein Großteil der Leistungsaufnahme und damit des Stromverbrauchs ist den Nebenaggregaten zuzurechnen. Während die Hauptspindel nur im Rahmen des Zerspanvorgangs elektrische in mechanische Leistung umsetzt, laufen die meisten Aggregate im unregelmäßigen Konstantbetrieb. Mit dem Umlegen des Hauptschalters und dem Einschalten der Hauptantriebe werden diese Aggregate bedarfsunabhängig unter konstanten Bedingungen betrieben, sodass ein entsprechend hoher Grundlastanteil die Folge sein kann. Die Kühlschmierstoffversorgung, aktive Kühlsysteme und Hydraulikaggregate sind die wahren Stromverbraucher in Werkzeugmaschinen. Eine ungenutzte Maschine im eingeschalteten Zustand kann schnell zum verdeckten Kostentreiber werden.

Tab. 1 zeigt Messungen der mittlere Leistungsaufnahme sowie die sich daraus ergebenden Stromkosten pro Jahr an einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum am WZL für verschiedene Betriebsmodi. Den angegebenen Strompreisen wurde dabei ein Zwei-Schicht-Betrieb an 300 Tagen im Jahr zugrunde gelegt. Bleiben die Achsen der Werkzeugmaschine während der unbesetzten Nachtschicht in Regelung, beispielsweise aus thermischen Gründen, so führt dies zu jährlichen Kosten in Höhe von 2.741,47 €. Bei einem großen Maschinenpark können schnell entsprechend große Summen zusammenkommen. Ein Ausschalten von Werkzeugmaschinen hat somit definitiv das Potential, den Stromverbrauch im Betrieb zu reduzieren.

Tab. 1: mittlere Leistungsaufnahme und Stromkosten einer Werkzeugmaschine [4]

Nr.	Beschreibung	Leistungsaufnahme	Stromkosten pro Jahr*
1	Maschine eingeschaltet	0,50 kW	320,33 €
2	Maschine und Hauptantriebe eingeschaltet	4,29 kW	2.741,47 €
3	Maschine, Hauptantriebe und KSS eingeschaltet	8,27 kW	5.290,21 €

*bei 26,64 ct/kWh [2], 8 h Maschinenstillstand pro Tag und 300 Betriebstagen pro Jahr

Das regelmäßige Ausschalten einer Werkzeugmaschine wirkt sich allerdings nicht nur auf den Stromverbrauch aus, sondern kann auch zwei weitere wichtige Punkte beeinflussen.

- 1) Thermisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
- 2) Lebensdauer von Elektronik- Komponenten

Bei Werkzeugmaschinen mit hohen Genauigkeitsanforderungen kann ein zu starkes Abkühlen der Struktur in Stillstandsphasen dazu führen, dass im Produktionsanlauf die geforderte Bauteilqualität nicht erreicht werden kann. Manche Anwender streben deshalb an, die Maschine dauerhaft in einem thermischen Beharrungszustand zu betreiben. Dieser ist immer eine Folge der zugrundeliegenden thermischen Randbedingungen im stationären Zustand. Eine allgemeine Aussage, inwiefern das Auskühlen einer Maschine die Arbeitsgenauigkeit beim Produktionsanlauf beeinflusst, kann deshalb nicht getätigt werden. An zwei beispielhaften Werkzeugmaschinen wurde deshalb das thermische Verhalten im eingeschalteten Zustand untersucht (vgl. Abb. 2). Die Grafiken zeigen deutlich unterschiedliche thermische Zeitkonstanten zur Erreichung von 80 % der Verlagerung im Beharrungszustand. Während bei Maschine 1 (5-Achs-Maschine, geringe Gesamtmasse) vergleichsweise zügig ein beharrungsnaher Zustand erreicht werden kann, dauert dies bei Maschine 2 (4-Achs-Maschine, große

Gesamtmasse) aufgrund der deutlich größeren Wärmekapazität bedeutend länger. Während bei ausgesprochen großen Maschinen oder Anwendungen mit besonderen Genauigkeitsanforderungen ein regelmäßiges Ausschalten der Anlage den thermischen Haushalt stören kann, existieren viele Anwendungen, in denen sich die Auswirkungen eines regelmäßigen Anlagenabschaltens in einem vertretbaren Rahmen bewegen.

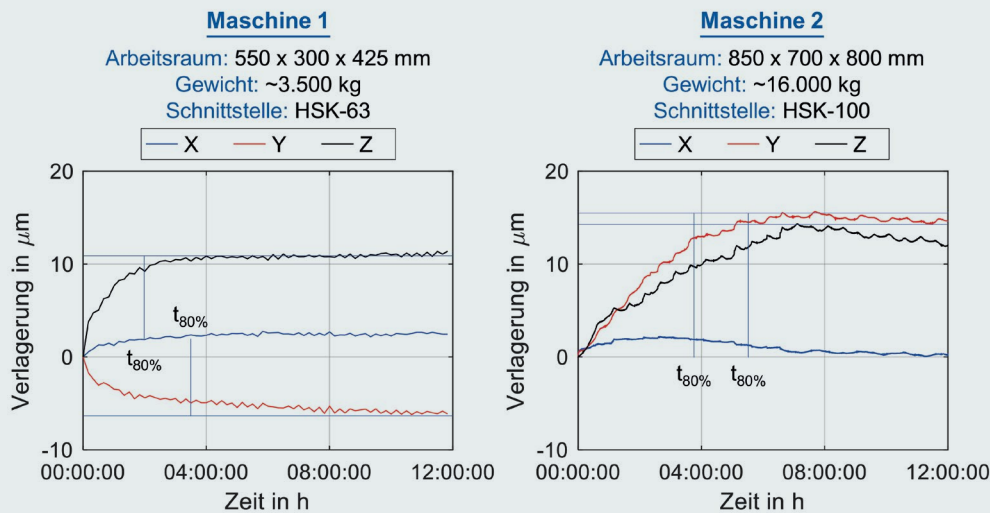


Abb. 2: Thermo-elastischer Verlagerungsgang zweier Werkzeugmaschinen im eingeschalteten Zustand (ohne Achsbewegungen) [4]

Ein regelmäßiges Ein- und Ausschalten kann sich darüber hinaus auf die Lebensdauer von Elektronik-Komponenten, wie Halbleiterelementen oder Kondensatoren, auswirken. Beim Einschalten können kurzzeitig Einschaltströme fließen, die ein Vielfaches des späteren Nennstroms betragen. Kommerzielle Umrichter sind deshalb standardmäßig mit einem Einschaltstrombegrenzer, auch Softschalter genannt, ausgestattet und erreichen damit schadensfreie Netzschalthäufigkeiten von 120 s.

EINFLUSS VON LASTSPITZEN

Hohe Achsbeschleunigungen sind bei vielen Bearbeitungen Befähiger einer produktiven Zerspanung, erfordern aber gleichzeitig entsprechend hohe Antriebsleistungen. Steile Geschwindigkeitsprofile rufen kurzzeitig hohe Achsströme, auch Lastspitzen genannt, hervor. In modernen Steuerungen kann die maximale Beschleunigung der einzelnen Maschinenachsen vergleichsweise einfach über ein Maschinendatum modifiziert werden. In Versuchen am WZL wurde der Einfluss von Lastspitzen auf den Stromverbrauch einer Werkzeugmaschine untersucht (vgl. Tab. 2). Dabei wurde die Fertigung zweier Bauteile betrachtet. Die Herstellung von Bauteil 1, einem Aluminium-Impeller, erfordert eine komplexe 5-Achs-Bearbeitung mit vielen schnellen Bewegungen in den Vorschubachsen und dem Einsatz von Kühl-Schmierstoff. Bei Bauteil 2 hingegen handelt es sich um ein 3-Achs-Bauteil aus Stahl. In den Versuchen wurden drei Beschleunigungsstufen betrachtet - 100 %, 75 % und 50 %. Während bei Bauteil 2

kein Einfluss der Beschleunigung auf die Produktivität und den Stromverbrauch auszumachen ist, zeigt sich bei Bauteil 1 ein differenziertes Bild. Eine Reduktion der Achsbeschleunigung sorgt hier für einen nicht unerheblichen Anstieg der Fertigungsdauer pro Teil. Im Falle des Stromverbrauchs ergibt sich ein interessantes Szenario. Eine Reduktion des Lastspitzeneinflusses sorgt zunächst für eine Verringerung des Stromverbrauchs pro Bauteil. Wird die Beschleunigung allerdings weiter reduziert, kehrt sich dieser Effekt deutlich um. Dies kann damit erklärt werden, dass der Lastspitzeneinfluss hier nur noch vergleichsweise gering ist. Gleichzeitig sorgt die Verlängerung der Prozesszeit allerdings für einen größeren Einfluss der Nebenaggregate im Stromverbrauch pro gefertigtem Bauteil. Insgesamt haben Lastspitzen in Folge von hohen Achsbeschleunigungen somit einen vergleichsweise geringen Einfluss auf den Stromverbrauch. In jedem Einzelfall muss deshalb individuell abgewägt werden, in welchem Maße eine Reduktion der Achsbeschleunigung zielführend ist.

Tab. 2: Einfluss der Achsbeschleunigung auf die Prozesszeit und den Stromverbrauch am Beispiel zweier Bauteile

Achsbeschleunigung	Bauteil 1 – 5-Achs		Bauteil 2 – 3-Achs	
	100 %	0,804 kWh	3:56 min	1,163 kWh
75 %	0,795 kWh	4:03 min	1,163 kWh	13:07 min
50 %	0,853 kWh	4:15 min	1,163 kWh	13:07 min

Insgesamt existieren verschiedene Maßnahmen, um die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen zu steigern. Schon einfachste Strommessungen an Werkzeugmaschinen können Transparenz bringen und damit die Grundlage für einen stromsparenden Betrieb bilden. Es gilt außerdem die Aussage, dass sich produktivitätssteigernde Maßnahmen letzten Endes auch positiv auf den Stromverbrauch auswirken. Mehrverbräuche in den Hauptaggregaten stehen meist in keinem Verhältnis zu den wahren Stromverbrauchern, den Nebenaggregaten.

[1] M. Dehli: Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. In: Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: Energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2019, S. 81–95.
 [2] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/>
 [3] C. Brecher: Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb – EWOTeK, Aachen, Apprimus Verlag, 2012.
 [4] Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen