

Entwicklung einer Messsystematik zur energetischen Vergleichbarkeit von spanenden Werkzeugmaschinen

An der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Graz

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.Ing.)

Vorgelegte Arbeit

von

Bernhard Schmiedhofer

Univ.-Prof.Dipl.Ing. Dr.techn. Franz Haas
Institut für Fertigungstechnik

Graz, 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am.....
(Datum/date)

.....
(Unterschrift/signature)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Franz Haas und vor allem bei meiner Betreuerin Dipl.-Ing. Manuela Redecker bei der Erstellung dieser Diplomarbeit bedanken.

Des Weiteren gilt mein Dank an die gesamten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts für Fertigungstechnik, welche mir beim Erstellen dieser Arbeit immer hilfreich zur Stelle waren.

Mein größter Dank gebührt meinen Eltern Franz und Charlotte Schmiedhofer, welche mich stets während meines Studiums unterstützt haben. Dank ihr Gespür für meine Stärken, habe ich mich für ein technisches Studium entschieden. Auch bei meiner Schwester Franziska möchte ich mich herzlichst bedanken. Sie hat mich schon seit meiner Schulzeit motiviert, eine technische Karriere einzuschlagen.

Außerdem möchte ich mir hier noch beim ganzen Personal des Landeskrankenhauses Graz bedanken. Ein von tiefsten Herzen besonderer Dank geht vor allem an alle Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der Onkologie. Ohne ihre Hilfe hätte ich wahrscheinlich diese Arbeit nicht zu Ende führen bzw. diese Worte nicht zusammenfassen können.

Kurzfassung

Durch das anhaltende Bevölkerungswachstum und den daraus resultierenden Energiebedarf werden Energiegesetze eingeführt, um den allgemeinen Energieverbrauch zu reduzieren. Die produzierende Industrie ist mit ihren metallbearbeiteten Werkzeugmaschinen einer der größten Energieverbraucher. Die bereits eingeführten Energiegesetze führen dazu, dass Werkzeugmaschinen mit energieeffizienten Komponenten und Baugruppen ausgerüstet werden müssen. Bei der Energieeinsparung spielt auch die Bearbeitungsstrategie eines Werkstückes eine wesentliche Rolle. Es müssen spezielle Leistungsmessungen und Auswertemethoden bei einer Werkzeugmaschine angewendet werden, damit Strategien für die Energieeinsparung umgesetzt werden können.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Leistungsmessungen an zwei verschiedener numerisch computergesteuerte Drehmaschinen. Der Energiefluss in der CNC-Drehmaschine wird in dieser Arbeit betrachtet und analysiert. Der Gesamtenergieverbrauch der beiden Werkzeugmaschinen wird gemessen und ein Vergleich aufgestellt. Mit dem spezifischen Energieverbrauch der Werkzeugmaschine, in Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens, kann eine Aussage getroffen werden, wann welche Werkzeugmaschine energieeffizienter ist.

Abstract

The continuous growth of population and the outcome of this demand of energy, new energy laws are established to reduce the energy consumption. The manufacturing industry with their metal cutting machines is one of the most energy-thirst industrial sector. To find a way to reduce the energy consumption of metal cutting machines power measurements and evaluation strategies must be implemented. The general goal is to find some potential for energy savings in metal cutting machines.

This thesis is about the power measurement of two different computer numerical controlled engine lathes. The energy flow of a lathe machine is analyzed more in detail. The total energy consumption of the machines is measured to do a comparison with the first engine lathe. With the specific energy consumption of the machine tool depending on the metal cutting removal rate a statement is possible, which machine tool is more energy-efficient.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Statutory Declaration	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	IV
Formelzeichen, Bezeichnungen und häufig verwendete Abkürzungen	VII
1. Einleitung und Aufgabenstellung	9
2. Die Ökodesign-Richtlinie	10
3. Bundes-Energieeffizienzgesetz	13
4. Kriterien für die Schaffung einer Effizienzplakette für Werkzeugmaschinen.....	14
5. Die Leistungsmessung von Werkzeugmaschinen.....	17
5.1. Theorie der Leistungsmessung	18
5.2. Das Leistungsmessgerät	19
5.3. Testwerkstück	23
5.4. Die Leistungsmessung	30
5.4.1. Gesamtleistung der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	30
5.4.2. Frässpindel der EMCO Hyperturn-665MCPlus	32
5.4.3. Hydraulik der EMCO Hyperturn-665MCPlus	32
5.4.4. B-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	34
5.4.5. Werkzeugmagazin der EMCO Hyperturn-665MCPlus	35
5.4.6. Kühlmittelpumpe-WZW der EMCO Hyperturn-665MCPlus	36
5.4.7. Kühlmittelpumpe-Frässpindel der EMCO Hyperturn-665MCplus	37
5.4.8. Kühlaggregat der EMCO Hyperturn-665MCPlus	38
5.4.9. X1-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus	39
5.4.10. Z1-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	40
5.4.11. X2-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus	40
5.4.12. Z2-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	41
5.4.13. Hauptspindel der EMCO Hyperturn-665MCPlus	42
5.4.14. Bestimmung der Zerspanungsenergie	43
5.4.15. Retrofit Faktor der Komponenten.....	47
5.5. Leistungsvergleich mit einer zweiten Maschine	52
5.5.1. Leistungs- und Energievergleich beider Werkzeugmaschinen.....	52
5.5.2. Retrofit Faktoren beider Hauptspindel	53
5.5.3. Spezifische Zerspanungsenergie der Voest Weipert WNC-500S	55
6. Resümee und Ausblick.....	58

Literaturverzeichnis	60
Abbildungsverzeichnis.....	62
Tabellenverzeichnis.....	63
Anhang.....	64

Formelzeichen, Bezeichnungen und häufig verwendete Abkürzungen

Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
I_W	A	Wirkstrom
I_B	A	Blindstrom
I	A	Strom
U	V	Spannung
φ	---	Phasenwinkel
P	W	Wirkleistung
Q	VAR	Blindleistung
S	VA	Scheinleistung
λ	---	Leistungsfaktor
E	J	Energieverbrauch der Maschine
t_0	s	Startzeitpunkt der Leistungsmessung
t_1	s	Endzeitpunkt der Leistungsmessung
Q	mm ³ /s	Zeitspannungsvolumen
v_c	m/min	mittlere Schnittgeschwindigkeit beim Außendrehen
A	mm ²	Spanungsquerschnitt
d_a	mm	Außendurchmesser
a_p	mm	Schnitttiefe
n	U/min	Drehzahl
f	mm/U	Vorschub je Umdrehung
d_{Bohrer}	mm	Bohrerdurchmesser
f_z	mm/U	Vorschub je Zahn
z	---	Zähnezahl

Q_{Bohren}	mm ³ /s	Zeitspanvolumen beim Bohren
A_f	mm ²	Kreisquerschnitt beim Bohren
I_R	---	Retrofit Faktor
A_E	---	Leistungsverhältnis
A_o	---	Lastkollektivfaktor
α_i	°	Regressionswinkel
$P_{i,norm}$	---	Normierte Leistung
$P_{i,min\ global}$	W	Minimal Leistung im Auswerteintervall
$P_{i,max\ global}$	W	Maximale Leistung im Auswerteintervall
$t_{i,norm}$	---	Normierte Zeit
t_i	s	Gemessene Zeit
$t_{i,max}$	---	Maximale Zeit des Auswerteintervalls

1. Einleitung und Aufgabenstellung

In den letzten Jahren ist das Umweltbewusstsein der Bevölkerung in der Europäischen Union (EU) stark gestiegen. Umweltaspekte und Nachhaltigkeit für nachfolgende Generationen rücken in den Vordergrund. Steigende Preise für Energie und CO₂-Zertifikate in der EU führen zu höheren Produktionskosten für Waren, die innerhalb der EU hergestellt werden. Da große Industrienationen wie die USA und Kanada das Kyoto-Protokoll nicht ratifiziert haben bzw. ausgestiegen sind¹, kommt es zu einem härteren Wettbewerb für europäische Produzenten am globalen Markt. Ein EU weites Ziel ist es, die Abhängigkeit von Primärenergiequellen, wie Öl und Erdgas, zu verringern. Um diese Ziele zu erreichen hat die Europäische Kommission Richtlinien eingeführt und werden in Folge von den Mitgliedsstaaten ins nationale Recht umgesetzt.

Eine dieser Richtlinie trägt den Namen „Richtlinie 2009/125/EG des europäischen Parlamentes und des Rates“, oder besser bekannt unter dem Namen „Ökodesign-Richtlinie“. Diese Richtlinie hat die Aufgabe den Primärenergieverbrauch innerhalb der Union zu senken. Die ergänzende Richtlinie 2012/27/EG im Jahre 2012 für die Ökodesign Richtlinie zielt darauf ab, den Primärenergieverbrauch bis zum Jahre 2020 um 20% aus dem Jahre 1990 zu senken.¹

Ein großer Energieverbraucher ist die Industrie mit ihren Werkzeugmaschinen. Somit hat der Maschinenbau die Verantwortung bekommen, seinen Anteil an diesem Ziel beizutragen. Dieser kann per Gesetz oder durch freiwillige Selbstregulierung erfolgen. Die Industrie hat sich für eine freiwillige Selbstregulierung entschieden. Vor allem Werkzeugmaschinen sind in der produzierenden Industrie für einen Großteil des Energieverbrauchs verantwortlich. Eine Energieplakette kann dem Käufer einer Maschine helfen, die effizienteste Werkzeugmaschine auszuwählen. Derzeit gibt es aber noch keine Kennzeichnung, wie eine Energieplakette für Werkzeugmaschinen ausschaun sollte. Energieplaketten werden bereits für verschiedenste Konsumgüter, wie zum Beispiel Fernsehgeräte oder Waschmaschinen, verwendet. Auch Fahrzeuge und Häuser werden bereits mit einer Energieplakette gekennzeichnet. Der Käufer hat mit dieser Plakette die Möglichkeit, den Energieverbrauch schnell und einfach abzulesen. Aus diesen Überlegungen wäre es sinnvoll eine Energieplakette auch für Werkzeugmaschinen einzuführen. Um Werkzeugmaschinen untereinander vergleichen zu können, müssen man vorher entsprechende Rahmenbedingungen schaffen. Es gibt eine große Anzahl von verschiedenen Arten von Werkzeugmaschinen. Deshalb muss für eine Vergleichbarkeit eine Selektierung der Werkzeugmaschinen in verschiedenen Klassen stattfinden. Sonst ist ein direkter Vergleich nicht möglich, bzw. die Aussagekraft einer Energieplakette wäre beschränkt.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit spanenden Werkzeugmaschinen. Es sollen Grundüberlegungen für die Schaffung einer Energieplakette erläutert werden. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt in der Leistungsmessung einer Werkzeugmaschine und deren Auswertung. Damit der Energieverbrauch einer Maschine angegeben werden kann, muss eine Leistungsmessung beim Fertigen eines Referenzwerkstückes stattfinden. Mit Hilfe eines Referenzwerkstückes können Werkzeugmaschinen hinsichtlich ihres Gesamtenergieverbrauchs untereinander verglichen werden und verschiedene Baugruppen

¹ www.nachhaltigkeit.info (23.2.2014)

² <http://eur-lex.europa.eu> (23.2.2014)

und Komponenten in einer Werkzeugmaschine mittels einer Leistungsmessung analysiert werden. In dieser Diplomarbeit werden zwei CNC-Drehbearbeitungszentren, welche sich am Institut für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Graz befinden, untereinander verglichen und analysiert. Außerdem wird der Energiefluss in einer Werkzeugmaschine untersucht, um zu verstehen, wo sich die größten Verbraucher befinden.

2. Die Ökodesign-Richtlinie

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, hat die Ökodesign-Richtlinie das Ziel, den Primärenergieverbrauch in der Europäischen Union zu senken. Die Richtlinie sieht vor, dass alle energieverbrauchsrelevanten Produkte umweltgerecht gestaltet werden müssen, um damit energetische Einsparungen und die damit verbundenen Umweltziele zu erreichen. Unter diese Produkte fallen zum Beispiel Fernsehgeräte, Elektromotoren, Glühbirnen und auch Werkzeugmaschinen. In Werkzeugmaschinen wird eine hohe Anzahl von Elektromotoren für Antriebe, Pumpen und andere Komponenten verbaut. Dies ist der Grund, warum in ihnen ein großes Einsparpotenzial steckt und weshalb sie in diese Richtlinie aufgenommen worden sind. Bis zur Einführung dieser Richtlinie spielte der Energieverbrauch einer Werkzeugmaschine für Unternehmer nur eine untergeordnete Rolle. Erst durch die stark steigenden Energiepreise ist es für Produzenten interessant geworden, in welchen Baugruppen die Energie in der Maschine genau verbraucht wird. Durch eine genaue Leistungsanalyse können Entscheidungen getroffen werden, ob bestimmte Baugruppen oder Bauteile gegen effizientere ausgetauscht werden sollen. Auch die Bearbeitungsstrategie kann durch eine Leistungsmessung genauer analysiert und effizienter gestaltet werden.

Österreichische Strompreise sind ausgesprochen stabil

Strompreisentwicklung für Haushalte im EU-Vergleich

2005 bis 2011, Veränderung in Prozent gegenüber 2005; Basis 2005 = 100

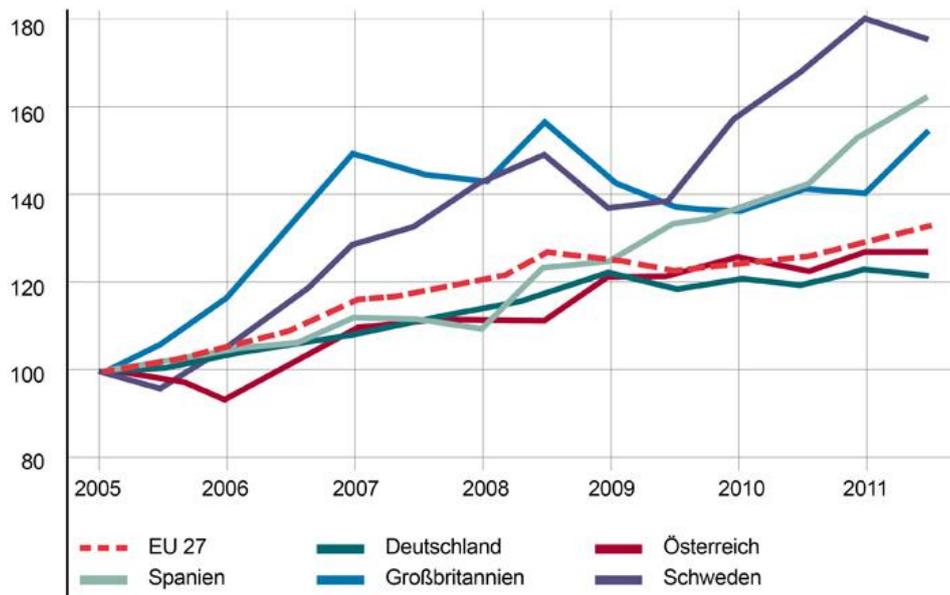


Abbildung 1: Strompreisentwicklung³

³ <http://oesterreichsenergie.at> (23.2.2014)

In Abbildung 1 ist die Strompreisentwicklung verschiedener Länder innerhalb der EU und dem EU-Durchschnitt zu erkennen. Man erkennt einen steigenden Trend seit dem Jahre 2005. Dieser Trend wird sich höchstwahrscheinlich auch in den nächsten Jahren fortsetzen.

Die nachfolgenden Punkte stellen nur einen kleinen Auszug aus der Ökodesign-Richtlinie dar, sollen aber die Hauptargumente dieser Richtlinie widerspiegeln.

- *„Mit dem in der Mitteilung der Kommission vom 18. Juni 2003 mit dem Titel „Integrierte Produktpolitik – Auf den ökologischen Lebenszyklus-Ansatz aufbauen“ beschriebenen Konzept, das ein wichtiger und innovativer Teil des Sechsten Umweltaktionsprogrammes der Gemeinschaft ist, wird das Ziel verfolgt, die Umweltauswirkungen von Produkten während ihres gesamten Lebenszyklus einschließlich Auswahl und Einsatz von Rohmaterialien, Fertigung, Verpackung, Transport und Vertrieb, Installierung und Wartung, Nutzung und Ende der Lebensdauer zu verringern...“⁴*

Der Energie- und Umweltaspekt spielt während des ganzen Lebenszyklus eines Produktes eine entscheidende Rolle. Die Abschnitte eines Produktlebenszyklus sind in Abbildung 2 dargestellt. Die Werkzeugmaschine spielt im Prozessblock Verarbeitung eine grundlegende Rolle. Damit die Verarbeitung energieschonend stattfinden kann, müssen energieeffiziente Maschinen eingesetzt werden. Die Richtlinie sieht vor, jeden einzelnen Prozessblock im Lebenszyklus so energieeffizient wie möglich zu gestalten. Erst dadurch kann sichergestellt werden, dass bei der Herstellung eines Produktes so wenig Energie wie möglich verbraucht wird.



Abbildung 2: Lebenszyklus eines Produktes

- *„Bei vielen energieverbrauchsrelevanten Produkten besteht ein erhebliches Verbesserungspotenzial im Hinblick auf die Verringerung der Umweltauswirkungen und auf Energieeinsparungen durch bessere Gestaltung, was auch zu wirtschaftlichen Einsparungen für Unternehmen und Endverbraucher führt...“⁵*

Meistens werden Komponenten und Baugruppen in Werkzeugmaschinen überdimensioniert. Im Allgemeinen ist es schwer vorherzusagen, wofür eine Werkzeugmaschine, besonders bei Kleinunternehmen, benötigt wird. Verschiedene Werkstücke erfordern unterschiedliche Bearbeitungsmöglichkeiten und Maschinen. In Großunternehmen werden Werkzeugmaschinen eingesetzt, die nur eine gewisse Bearbeitung für große Stückzahlen ausführen müssen. Als Beispiel ist eine Schleifmaschine in der Getriebeproduktion zu nennen, welche Getriebewellen auf ein bestimmtes Maß schleift. Bei vielen Klein- und Mittelunternehmen decken die Werkzeugmaschinen ein großes Aufgabengebiet ab. Die in der Werkzeugmaschine verbauten Komponenten und Baugruppen werden oft größer

^{4,5} <http://eur-lex.europa.eu> (23.2.2014)

dimensioniert, damit eine Leistungsreserve gegeben ist. Deshalb besteht schon alleine durch eine richtige Gestaltung und eine Abklärung der Aufgabengebiete der Maschine ein großes Einsparpotenzial hinsichtlich des Energieverbrauchs.

- *„Der Energieverbrauch energieverbrauchsrelevanter Produkte im Bereitschafts- oder ausgeschalteten Zustand sollte grundsätzlich soweit angebracht auf das für ihren ordnungsgemäßen Betrieb erforderliche Mindestmaß gesenkt werden.“⁶*

Meistens werden Werkzeugmaschinen schon einige Stunden vor der Nutzung eingeschaltet, um auf Betriebstemperatur hochzufahren. Erst wenn die Werkzeugmaschine die Betriebstemperatur erreicht hat, können Werkstücke mit der gewünschten hohen Genauigkeit produziert werden. So hat die Temperatur einen Einfluss auf die Längenänderung im Werkstoff der Werkzeugmaschine. Man spricht hier auch von der thermischen Stabilität der Werkzeugmaschine, d.h. wie schnell sich die Werkzeugmaschine erwärmt und abkühlt. Würde man sie immer ein- und ausschalten, so ginge die thermische Stabilität verloren und man produzierte im hohen Maße Ausschuss. Gibt es jedoch eine genaue Arbeitsplanung und man weiß überdies, wann eine Werkzeugmaschine benötigt wird und wann nicht, so können Überlegungen getroffen werden diese auszuschalten oder in einen energiearmen Zustand, den StandBy-Betrieb, zu setzen.

- *„Energieverbrauchsrelevante Produkte, die die Ökodesign-Anforderungen der Durchführungsmaßnahmen zu dieser Richtlinie erfüllen, sollten die CE-Kennzeichnung und entsprechende Angaben tragen, um das Inverkehrbringen und der freien Verkehr im Binnenmarkt zu ermöglichen...“⁷*

Produkte die heutzutage eine CE-Kennzeichnung besitzen, müssen den Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie genügen. Hat man die Auswahl zwischen mehreren Werkzeugmaschinen, so möchte der Käufer wissen, welche Maschine die kostengünstigste und die energieeffizienteste ist. Mit der CE-Kennzeichnung alleine kann keine Auskunft über die Energieeffizienz gemacht werden. Sie sagt nur aus, dass das Produkt den Anforderungen der Ökodesign-Richtlinie genügt, aber nicht in welchem Maße. So könnte zum Beispiel eine Energieplakette eingeführt werden, wie sie bereits bei Fernsehgeräten, Waschmaschinen und anderen Konsumgütern in Verwendung ist. Diese Energieplakette könnte eine Auskunft über den Energieverbrauch einer Werkzeugmaschine geben.

^{6,7} <http://eur-lex.europa.eu> (23.2.2014)

3. Bundes-Energieeffizienzgesetz

Durch die Ökodesign-Richtlinie der EU ist das österreichische Parlament verpflichtet, ein neues Bundes-Energieeffizienzgesetz einzuführen. Hier muss das Europäische Recht in nationales Recht bis spätestens Sommer 2014 umgesetzt werden. Dieses Gesetz, welches sich noch in Ausarbeitung befindet, sieht vor, dass in Österreich bis zum Jahre 2020 eine Energiemenge von 80.400 Terajoule eingespart werden soll. Die Unternehmen wären verpflichtet, einen Energiemengenanteil von 70 Petajoule miteinzusparen. Diese Gesetzesvorlage betrifft alle Unternehmen, auch wenn sie nur Dienstleister und keine Produzenten sind. Außerdem steht im Gesetzesentwurf folgende wichtige Passage geschrieben:

„§ 8.

(1) Die verpflichteten Unternehmen haben nach Maßgabe dieses Bundesgesetzes im Zeitraum zwischen dem 1. Jänner 2014 und dem 31. Dezember 2020 insgesamt jährlich Endenergieeffizienzmaßnahmen zu setzen, die zu einer anrechenbaren Energieeffizienzsteigerung in Höhe von jährlich 1,5% des Endenergieverbrauches in Österreich gemäß Abs. 2 führen.

(2) Als Ausgangswert für die 1,5% ist jener Mittelwert heranzuziehen, der sich aus dem energetischen Endverbrauch über die letzten drei Jahre vor Anwendungsbeginn der Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU unter Abzug des Eigenverbrauches und des Sektors Verkehr ergibt...“⁸

Das bedeutet konkret, dass jedes Unternehmen in Österreich jährlich 1.5 % der verbrauchten Energie im Unternehmen einsparen muss. So wird ein produzierendes Unternehmen ebenso wie ein Dienstleistungsunternehmen betroffen sein. Verbraucht ein Unternehmen weniger als 10 GWh im Jahr und beschäftigt es weniger als 5 Personen, oder übersteigt seine Jahresbilanz nicht eine Million Euro, so wird das Unternehmen von dieser Verpflichtung ausgenommen.⁹

In produzierenden Betrieben wird ein verstärktes Hauptaugenmerk auf Werkzeugmaschinen gesetzt. Leistungsmessungen an Werkzeugmaschinen sollen dazu führen, dass ineffiziente Bauteile und Baugruppen identifiziert und wenn nötig ausgetauscht werden. Wird das Gesetz in naher Zukunft umgesetzt, so sollen Leistungsmessungen und die davon abgeleiteten Maßnahmen einen Beitrag zu Energieeinsparungen in Unternehmen leisten.

^{8,9} <http://www.parlament.gv.at> (25.2. 2014)

4. Kriterien für die Schaffung einer Effizienzplakette für Werkzeugmaschinen

Eine Effizienzplakette für eine Werkzeugmaschine soll eine genaue Aussage treffen, wieviel Energie die Maschine verbraucht. Derzeit gibt es bereits Effizienzplaketten bei verschiedenen Konsumgütern, wie zum Beispiel Fernsehgeräten, Waschmaschinen und anderen Waren. Auch Fahrzeuge und Häuser werden bereits mit einer Energieplakette gekennzeichnet. So hat der Verbraucher den Vorteil, dass er mit einem Blick schnell und einfach den Energieverbrauch des Produktes ablesen kann. Es gibt Überlegungen, dass dies in Zukunft für Werkzeugmaschinen gelten soll. Jedoch haben Werkzeugmaschinen den Nachteil, dass sie sich untereinander nicht so einfach vergleichen lassen. Der Grund dafür liegt darin, dass für jedes Fertigungsverfahren, laut DIN 8580¹⁰, eigene Maschinen eingesetzt werden. In Abbildung 3 ist die Aufteilung der Fertigungsverfahren nach den Hauptgruppen dargestellt. Deshalb müssen die Werkzeugmaschinen für die Vergleichbarkeit klassifiziert werden. Für jede Hauptgruppe werden unterschiedlichste Maschinen verwendet. Schon deshalb wird eine einzige Plakette nicht realisierbar sein. Erst durch eine Aufteilung der Maschinen in bestimmte Gruppen, kann eine aussagekräftige Energieplakette geschaffen werden.



Abbildung 3: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Diese Arbeit beschäftigt sich mit spanenden Werkzeugmaschinen der Hauptgruppe 3 Trennen. Unter Trennen versteht man das Bearbeiten eines Werkstückes, bei dem das Material mit Hilfe eines Werkzeuges abgetragen wird. Bevor Kriterien für eine Energieplakette definiert werden, ist es sinnvoll, die Werkzeugmaschine isoliert zu

¹⁰ <http://www.fachwissen-technik.de> (25.2.2012)

betrachten. Es wird eine Systemgrenze um die Maschine gezogen. Mit einer Systemgrenze werden alle Ein- und Ausgangsgrößen eines Systems schnell und einfach quantifiziert. Ein- und Ausgangsgrößen können Energie- und Materialströme, wie Strom, Hydraulik- und Kühlmittel sein. Damit sollen wichtige Einflussfaktoren für die Schaffung einer Energieplakette definiert werden. Außerdem ist jede Maschine unterschiedlich aufgebaut und besitzt eine unterschiedliche Anzahl von Komponenten und Baugruppen. Dies spielt ebenfalls für die Definierung einer Plakette eine Rolle. Die wichtigsten Einflussfaktoren einer Werkzeugmaschine sind in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt.

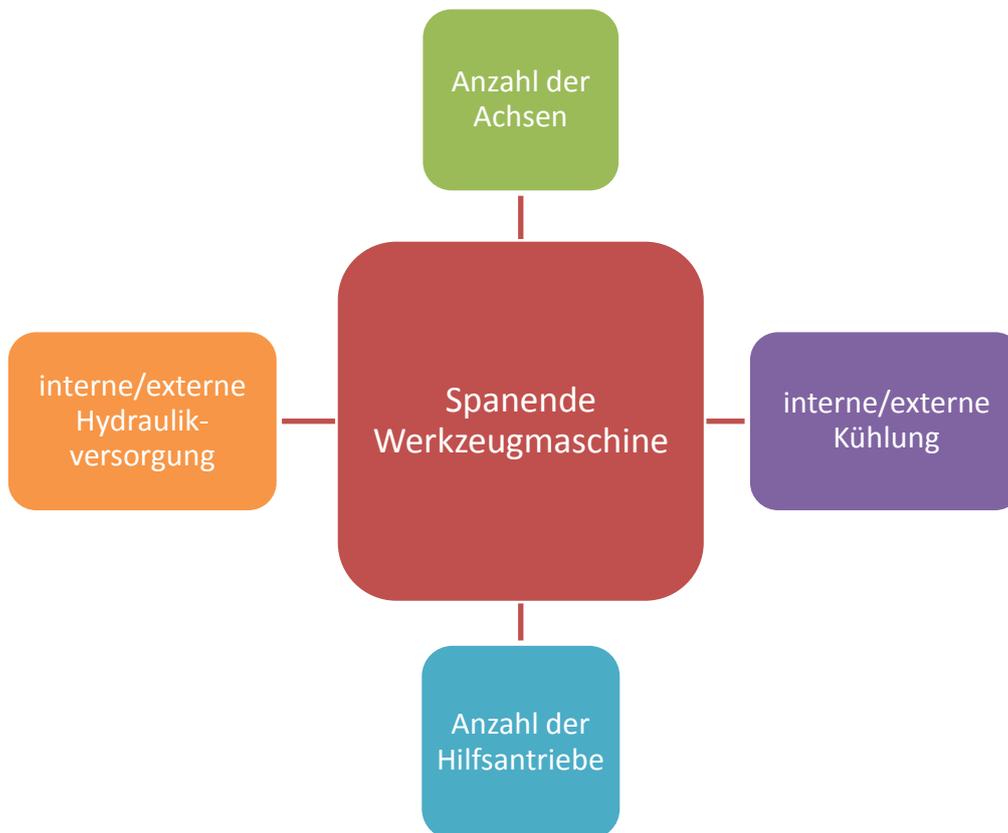


Abbildung 4: Einflussfaktoren einer Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschinen besitzen eine unterschiedliche Anzahl von Achsen und Antrieben. So kann eine CNC-Drehmaschine entweder nur eine Hauptspindel besitzen, oder auch eine zusätzliche Gegenspindel. In einem Maschinenpark, wo oft mehrere Werkzeugmaschinen gleichzeitig arbeiten, kann die Kühlung der Maschinen auch extern erfolgen. Ein externes Kühlaggregat besitzt die Aufgabe, gleichzeitig mehrere Maschinen zu kühlen. Dasselbe gilt auch für die Hydraulik. Hier gibt es auch eine unterschiedliche Anzahl von Hilfsantrieben. Unter Hilfsantrieben versteht man zum Beispiel zusätzliche Achsen zum Fräsen oder Bohren. Erst durch eine hohe Anzahl von Hilfs- und Hauptantrieben ist eine hohe Bearbeitungsflexibilität möglich. Wie man schon aus der Abbildung 4 erkennen kann, ist schon die alleinige Betrachtung spanender Werkzeugmaschinen sehr schwierig. Als Hilfestellung für eine Energiebilanz einer Maschine, muss, wie bereits erwähnt, eine Systemgrenze gezogen werden. Damit lassen sich alle Ein- und Ausgangsgrößen, und somit die Einflussgrößen für die Schaffung einer Energieplakette definieren.

Für den Gesamtenergieverbrauch einer Werkzeugmaschine wird eine Leistungsmessung mit einem Referenzwerkstück benötigt. Dieser Energieverbrauch soll in der Plakette angegeben werden, damit ein Vergleich zwischen verschiedenen Werkzeugmaschinen möglich wäre.

Hier ist es notwendig, ein Testwerkstück auf die unterschiedlichen Maschinengrößen zu skalieren. Eine leistungsstarke Maschine würde sonst im Vergleich zu einer leistungsschwachen Maschine schlechter abschneiden, da ihre Komponenten für größere Werkstücke ausgelegt sind. Während der Fertigung eines Referenzwerkstückes wird die gesamte Leistungsaufnahme der Maschine gemessen. In der Bachelorarbeit¹¹ von Herrn Brillinger wird die geometrische Gestaltung eines Testwerkstückes, und deren Zerspanungsparameter, definiert. Auf das Testwerkstück selbst wird in Kapitel 5.3 eingegangen. Wird eine Leistungsmessung durchgeführt, so können die Messergebnisse für das Definieren von Leistungsmerkmalen herangezogen werden.

Die Energieplakette einer spanenden Werkzeugmaschine kann im Allgemeinen mit zwei Merkmalen gekennzeichnet werden. Zum einen mit der StandBy-Leistung und zum anderen mit dem Gesamtenergieverbrauch für das Fertigen eines Testwerkstückes. Diese Kriterien orientieren sich an vorhandenen Produkten, wie zum Beispiel bei einem Fernsehgerät. Um schlussendlich die Effizienz einer Maschine zu charakterisieren, müssten zahlreiche Maschinen gemessen werden. Es könnte eine öffentliche Datenbank erstellt werden, anhand deren zu sehen ist, welche vermessene Werkzeugmaschine am energieeffizientesten ist. In Abbildung 5 wird ein Beispiel einer Effizienzplakette einer spanenden Werkzeugmaschine dargestellt.

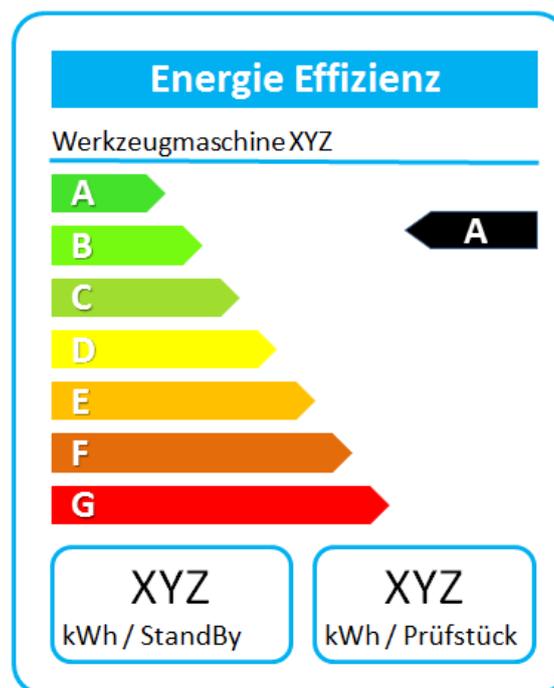


Abbildung 5: Beispiel einer Effizienzplakette

Eine Energieplakette in dieser Form einzuführen, wäre ein allgemeiner Vorschlag. Wie bereits vorher erwähnt, sind die meisten Werkzeugmaschinen unterschiedlich aufgebaut und erfüllen unterschiedliche Aufgaben in Unternehmen. Jede Werkzeugmaschine könnte somit als Unikat angesehen werden. Es könnten auch andere Effizienzkriterien definiert werden, aber es sollte immer im Vordergrund stehen, dass eine Plakette mit einer möglichst geringen Anzahl von Kennzahlen zu schaffen. Eine einfache Gestaltung einer Energieplakette soll einem Maschinenkäufer helfen, schnell und einfach die effizienteste Werkzeugmaschine auszuwählen.

¹¹ Vgl. Brillinger M. (2013)

5. Die Leistungsmessung von Werkzeugmaschinen

In dieser Arbeit werden zwei CNC-Drehbearbeitungszentren, die sich am Institut für Fertigungstechnik an der Technischen Universität Graz befinden, auf ihren Leistungsverbrauch hin analysiert. Mittels Leistungsmessungen an beiden Maschinen sollen Überlegungen für die Schaffung einer Energieplakette von spanenden Werkzeugmaschinen geschaffen werden. Bei den Maschinen handelt es sich um eine EMCO Hyperturn-665MCPlus und um eine Voest Weipert-WNC500S (Abbildung 6). Im Anhang A1 bis A10 sind die wichtigsten Leistungsgrößen aus den Datenblättern beider Maschinen aufgelistet. Ein Testwerkstück soll einen direkten Vergleich beider Werkzeugmaschinen auf ihren Energieverbrauch hin ermöglichen. Bei beiden CNC-Drehmaschinen wird die Gesamtleistung und die Hauptspindelleistung gemessen. Um ein besseres Verständnis zu bekommen, wohin die Energie in einer Werkzeugmaschine fließt und wo sie verbraucht wird, wird die EMCO-Hyperturn Maschine genauer leistungsvermessen. Die EMCO-Hyperturn Werkzeugmaschine ist im Vergleich zu der Voest-Weipert Maschine moderner und entspricht mehr dem heutigen Stand der Technik. Es werden jene Komponenten vermessen, welche für das Fertigen des Testwerkstückes notwendig sind. Durch eine genaue Leistungsvermessung der einzelnen Komponenten können Überlegungen angestellt werden, ob diese effizient ist und die richtige Dimensionierung für das Fertigen des Testwerkstückes besitzt. Die Leistungsmessung der Werkzeugmaschinen zeigt auch, welche Maschine für das Fertigen des Testwerkstückes effizienter ist.

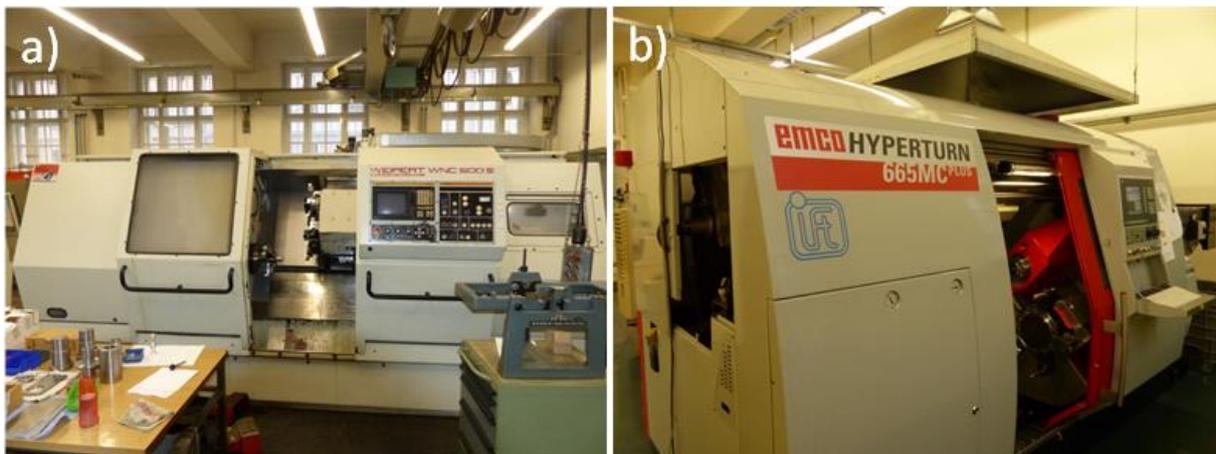


Abbildung 6: a) Voest Weipert WNC-500S b) EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.1. Theorie der Leistungsmessung

Grundlage für die Leistungsmessung ist die Bestimmung der verschiedenen Leistungsarten. Die elektrische Leistung lässt sich in Wirk-, Blind-, und Scheinleistung in einem Wechselstromkreis aufteilen. Aufgrund von Induktivitäten, in Stromleitungen und kapazitiven Widerständen in elektronischen Bauteilen, kommt es in einem Wechselstromkreis zu einer Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung. Ausgehend von der Spannung U , kann der Strom I durch die Phasenverschiebung φ in einen Wirkstrom I_W und einen Blindstrom I_B aufgeteilt werden. In der Abbildung 7 sind beide Stromarten in einem Zeigerdiagramm dargestellt.¹²

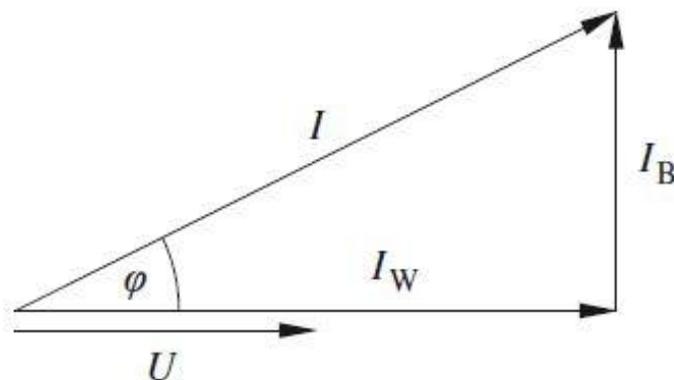


Abbildung 7: Wirk- und Blindstrom in einem Zeigerdiagramm¹³

Der Wirkstrom I_W ergibt sich aus dem Strom I und dem Phasenwinkel φ zwischen Strom und Spannung U .

$$I_W = I \cdot \cos\varphi \text{ [A]} \quad (1)$$

Der Blindstrom I_B wiederum, ergibt sich über die Winkelfunktion mit dem Sinus.

$$I_B = I \cdot \sin\varphi \text{ [A]} \quad (2)$$

Werden die Stromanteile im Zeigerdiagramm mit der Spannung multipliziert, so erhält man die Blindleistung Q , die Wirkleistung P und die Scheinleistung S (siehe Abbildung 8).

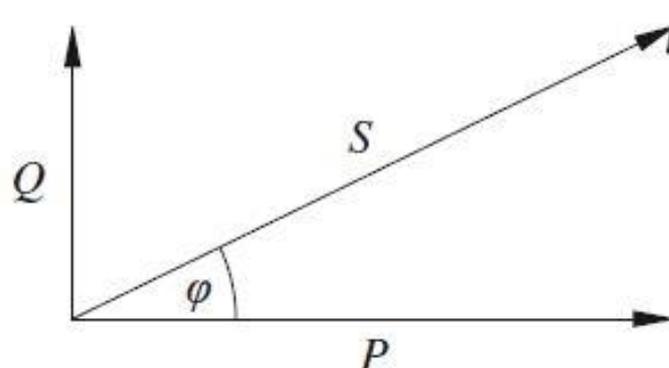


Abbildung 8: Wirk- und Blindleistung in einem Zeigerdiagramm¹⁴

^{12,13,14} Vgl. Plaßmann W., Schultz D. (2012)

Die Wirkleistung P ergibt sich aus der Spannung U , dem Strom I und dem Phasenwinkel φ .

$$P = U \cdot I_W = U \cdot I \cdot \cos\varphi \text{ [W]} \quad (3)$$

Die Blindleistung Q ergibt sich aus Spannung U und Blindstrom I_B .

$$Q = U \cdot I_B = U \cdot I \cdot \sin\varphi \text{ [VAR]} \quad (4)$$

Die Scheinleistung S ergibt sich mit Hilfe des Satzes von Pythagoras aus Blind- und Wirkleistung, bzw. aus der Multiplikation von der Spannung U mit dem Strom I .

$$S = \sqrt{Q^2 + P^2} = U \cdot I \text{ [VA]} \quad (5)$$

Im Allgemeinen wird das Verhältnis zwischen Wirk- zu Scheinleistung als Leistungsfaktor λ bezeichnet.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \cos\varphi \quad (6)$$

Eine weitere wichtige Größe ist die verbrauchte Energie E einer Komponente, bzw. der betrachteten Maschine. Die verbrauchte Energie E ist für die Schaffung einer Vergleichbarkeit zwischen Werkzeugmaschinen ausschlaggebend.

$$E = \int_{t_0}^{t_1} P \, dt \text{ [J]} \quad (7)$$

Damit sind alle wichtigen zu erfassenden elektrische Kenngrößen einer Leistungsmessung definiert. Mit diesen Messgrößen kann eine Grundlage für die Schaffung einer Vergleichbarkeit zwischen spanenden Werkzeugmaschinen geschaffen werden.

5.2. Das Leistungsmessgerät

Die Leistungsmessung erfolgt mit einer Messausrüstung der Firma *Dewetron*. Für die Gesamtleistungsmessung einer Werkzeugmaschine müssen drei Ströme und drei Spannungen gemessen werden, da eine Werkzeugmaschine im Allgemeinen in einem Dreiphasennetz betrieben wird. Damit werden die für die Messung der Gesamtleistung sechs Kanäle beim Messgerät benötigt. Für Komponentenmessung in einer Maschine werden ebenfalls drei Ströme und drei Spannungen für die Leistungsbestimmung benötigt.

Eine Komponentenmessung soll immer gleichzeitig mit der Gesamtleistung der Maschine mitgemessen werden, da sonst eine zeitliche Zuordnung beider Leistungsverläufe kaum möglich ist. Eine zeitliche Zuordnung der Messungen muss stets gegeben sein, damit eine Vergleichbarkeit zwischen den Werkzeugmaschinen stattfinden kann. Insgesamt werden damit zwölf Messkanäle für die Leistungsmessung benötigt. In Abbildung 9 sind die benötigten Ausrüstungsgegenstände für eine Leistungsmessung dargestellt.

Die Ausrüstung besteht aus folgenden Komponenten:

- **Computer mit einer A/D-Karte**

Die Analog/Digitalkarte im Computer dient dazu, dass die analogen Messgrößen wie Strom und Spannung, in digitale Größen umgewandelt werden können. Erst dadurch können diese Messgrößen für weitere Berechnungen und Auswertungen verwendet werden.



Abbildung 9: Ausrüstung für die Leistungsmessung

- **Dewe30 Chassis mit 6xLV- und 6xHV-Messverstärkerkarten**

In einem externen Gehäuse, dem DEWE30, sind die Messverstärkerkarten für Strom und Spannung untergebracht. Diese Messverstärkerkarten sind in einen Niederspannungsbereich (*Low-Voltage* Messverstärker) und einen Hochspannungsbereich (*High-Voltage* Messverstärker) unterteilt. Die LV-Module dienen für die Strommessung und die HV-Module für die Spannungsmessung. Es können Spannungen bis zu 1.400 Volt gemessen werden. Vor allem in Zwischenkreisen, wie zum Beispiel in Frequenzumrichtern, können höhere Spannungen als im Stromnetz auftreten. Die Karten sind sicherheitstechnisch gegen 2.000 Volt abgesichert.

- **Rogowski-Spulen**

Die Rogowski-Spule dient zur Messung von Wechselstrom. Sie besteht aus einem nicht ferromagnetischen Kernmaterial, worauf eine Spule gleichmäßig aufgewickelt ist. Wird diese Spule um einen Leiter gelegt, so induziert der Wechselstrom eine Spannung in der Spule. Diese Spannung wird gemessen und in den zu messenden Strom zurückgerechnet. Die Funktionsweise ist schematisch in der Abbildung 10b) dargestellt. In Abbildung 10a) ist die bei den Messungen verwendete Rogowski-Spule zu sehen. Die induzierte Spannung U wird über den HV-Modul meist in eine

höhere Spannung U_M umgewandelt, damit die A/D-Karte die Messgröße erfassen kann. Der große Vorteil der Rogowski-Spule ist, dass sie sehr flexibel ist und damit einfach und schnell über die Messleitung zu legen ist. Auch kann sie im Vergleich zu der Strommesszange über größere Leitungsquerschnitte montiert werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Werkzeugmaschine nicht vom Netz getrennt werden muss, um den Strom messen zu können.¹⁵

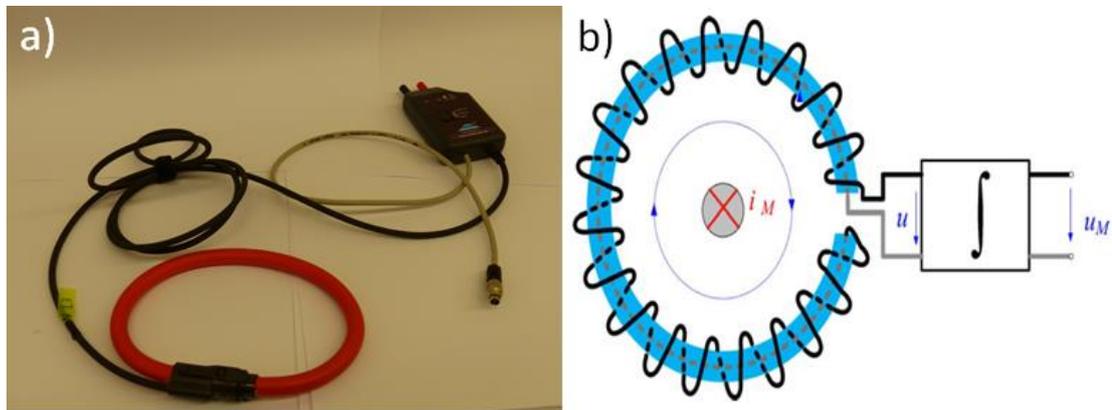


Abbildung 10: a) Rogowski Spule in Natura b) Aufbau einer Rogowski Spule¹⁶

- **Stromzangen**

Die Stromzange ist analog der Rogowski-Spule aufgebaut. Sie kann jedoch auch Gleichströme messen. Um dies zu ermöglichen, ist ein Hall-Sensor eingebaut. In Abbildung 11b) ist die Funktionsweise einer Stromzange dargestellt. Im linken Teil der Abbildung 11a), ist die Stromzange zu sehen. Es gibt zwei verschiedene Messprinzipien von Stromzangen. In Abbildung 11b) linke Spule, erzeugt die Messleitung ein elektromagnetisches Feld. Dieses Feld erzeugt im Hall Sensor eine messbare Spannung, da der Strom senkrecht dazu abgelenkt wird. Der ferromagnetische Kern dient zum Konzentrieren des elektromagnetischen Feldes und zum Abschirmen gegen äußere Störfelder. Magnetische Sättigung des Kerns, Linearitätsfehler und Temperaturabhängigkeit verfälschen das Messergebnis und sind als Nachteile zu erwähnen. Deshalb gibt es eine weitere Methode, dargestellt in Abbildung 11b) rechts.

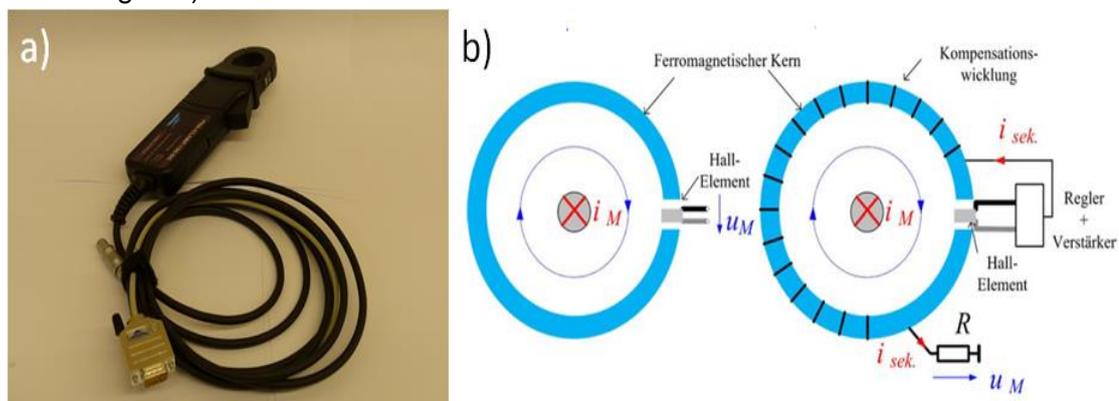


Abbildung 11: a) Stromzange in Natura b) Funktionsweise eine Stromzange¹⁷

^{15,16,17} Vgl. Teiglkötter J. (2012), S.118ff

Der Hall-Sensor hat die Aufgabe den Regler und Verstärker so zu steuern, dass das magnetische Feld in der Kompensationswicklung zu Null wird. Dafür wird der sekundäre Strom i_{sek} in der Kompensationswicklung benötigt. Dieser Strom wird mit einem Widerstand R in eine Messspannung U_M für die Messmodule umgewandelt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die vorhin erwähnten Nachteile, wie Temperatureinfluss und Linearitätsfehler, ausgeschlossen werden können.¹⁸

- **DEWESoft™**

Für die Auswertung der Messsignale wird von der Firma Dewetron die Software DEWESoft™ verwendet. Mit dieser Software können die Messdaten analysiert und ausgewertet werden. Die Software wird am Rechner benötigt, in dem die A/D-Karte installiert ist. Sie dient zum Erfassen und zum Bearbeiten der Messdaten. Die Daten können an einem beliebigen Rechner bearbeitet werden. Außerdem können die Daten in andere Formate exportiert und bearbeitet werden, wie zum Beispiel mit Microsoft Excel®. Die Software ist vor allem durch ihre Benutzerfreundlichkeit gekennzeichnet. Im Programm lassen sich die zeitliche Verläufe von Strömen, Spannungen, Energien und Leistungen darstellen. In Abbildung 12 ist die Benutzeroberfläche während einer Leistungsmessung abgebildet.



Abbildung 12: Benutzeroberfläche von DEWESoft™

¹⁸ Vgl. Teiglkötter J. (2012), S.118ff

5.3. Testwerkstück

Für die Vergleichbarkeit von spanenden Werkzeugmaschinen müssen Rahmenbedingungen, wie ein Testwerkstück und eine Auswertemethode, definiert werden. Die geometrische Gestaltung, Werkstoff und die benötigten Prozessparameter, wie Schnitttiefe, Vorschub und Drehzahl, sind für ein Testwerkstück festzulegen. Erst durch diese Festlegung kann ein standardisierter Prüfzyklus für die Vergleichbarkeit von Werkzeugmaschinen geschaffen werden.

Die *International Standard Organisation* beschäftigt sich ebenfalls mit dieser Thematik. Es soll eine Norm geschaffen werden, damit ein einheitlicher und einfacher Vergleich zwischen Werkzeugmaschinen stattfinden kann. Diese Norm befindet sich derzeit in Bearbeitung. Es handelt sich um die Norm ISO 14955, welche sich in vier Unterpunkte gegliedert ist.

- „ISO 14955-1, Eco-design methodology for machine tools
- ISO 14955-2, Methods of testing of energy consumption of machine tools and functional modules
- ISO 14955-3, Test pieces/test procedures and parameters for energy consumption on metal cutting machine tools
- ISO 14955-4, Test pieces/test procedures and parameters for energy consumption on metal forming machine tools“¹⁹

In der Norm ISO 14955-1 wird auf die effiziente Auslegung und Gestaltung von Werkzeugmaschinen eingegangen. Die Norm ISO 14955-3 beschäftigt sich in einem eigenem Kapitel mit einem Testwerkstück für metallbearbeitende Werkzeugmaschinen.

Es gibt bereits Veröffentlichungen und Vorschläge, wie die Leistungsmessung einer spanenden Werkzeugmaschine mittels eines Testwerkstücks erfolgen könnte. So entwickelten Newman S.T., Nassehi A., Imani-Asrai R. und Dhoka V. der Universität Bath in England zwei verschiedene Testwerkstücke für eine Fräsmaschine. Diese sind in der Abbildung 13a) und 13b) zu erkennen.²⁰

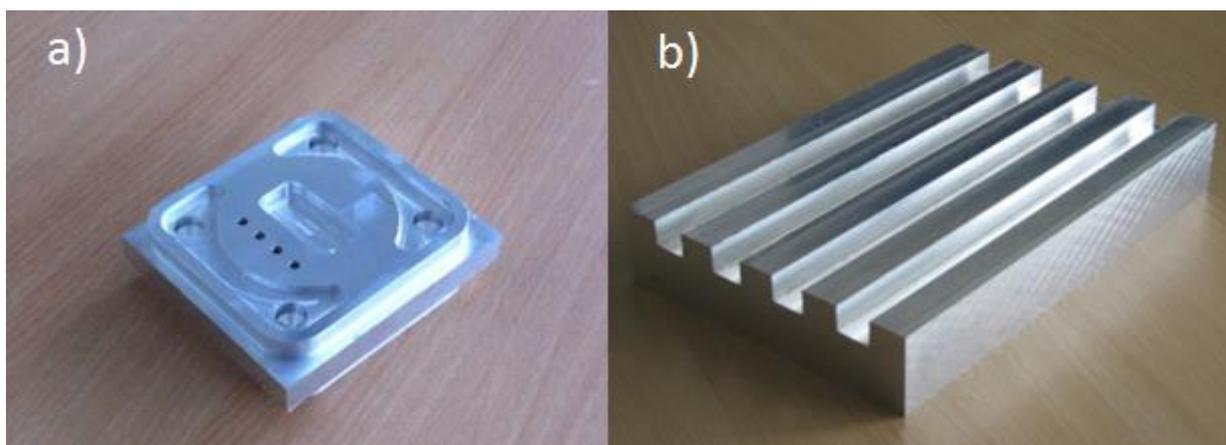


Abbildung 13: Testwerkstücke nach Newman, Nassehi, Asrai und Dhoka a) Testwerkstück mit komplexer Geometrie b) Testwerkstück mit Nuten²¹

¹⁹ www.environmentalleader.com (25.2.2014)

^{20,21} www.sciencedirect.com (25.2.2014)

In Abbildung 13a) ist ein Testwerkstück zu sehen, welches eine komplexere Geometrie aufweist, als das Werkstück in Abbildung 13b). Die Nuten im Werkstück in Abbildung 13b) haben einen Vorteil. Diese sind einfacher herzustellen und die Prozessparameter können besser variiert werden, als bei einem Werkstück mit komplexerer Geometrie. Als Bezugsgrößen für eine Vergleichbarkeit zwischen Werkzeugmaschinen kann das Zerspanungsvolumen und die dafür benötigte Maschinenleistung hergenommen werden. Die Nuten im Werkstück können durch unterschiedliche Zerspanungsparameter, wie Vorschub und Schnitttiefe, gefräst werden. Das Zerspanungsvolumen kann beim Nutenfräsen somit leichter variiert werden, als bei einem Werkstück mit komplexerer Geometrie, im Testwerkstück in Abbildung 13a) zu sehen ist. Die Maschine benötigt für jedes bestimmte Zerspanungsvolumen eine gewisse Leistung. Der Leistungsverlauf einer Maschine wird in einem Diagramm aufgetragen. Sind mehrere Werkzeugmaschinen vermessen worden, so können die Leistungsverläufe verglichen werden. Beim Vergleich der Leistungsverläufe kann festgestellt werden, welche Maschine effizienter für die Bearbeitung eines Testwerkstückes ist. Als Werkstoff für beide Testwerkstücke wird Aluminium gewählt. Bei Aluminium können höhere Prozessparameter, wie Schnittgeschwindigkeit und Schnitttiefe, gefahren werden, als bei einem Werkstück aus Stahl. Jedoch ist die Zerspanungsenergie, welche von der Maschine geleistet werden muss, geringer als bei Stahl.

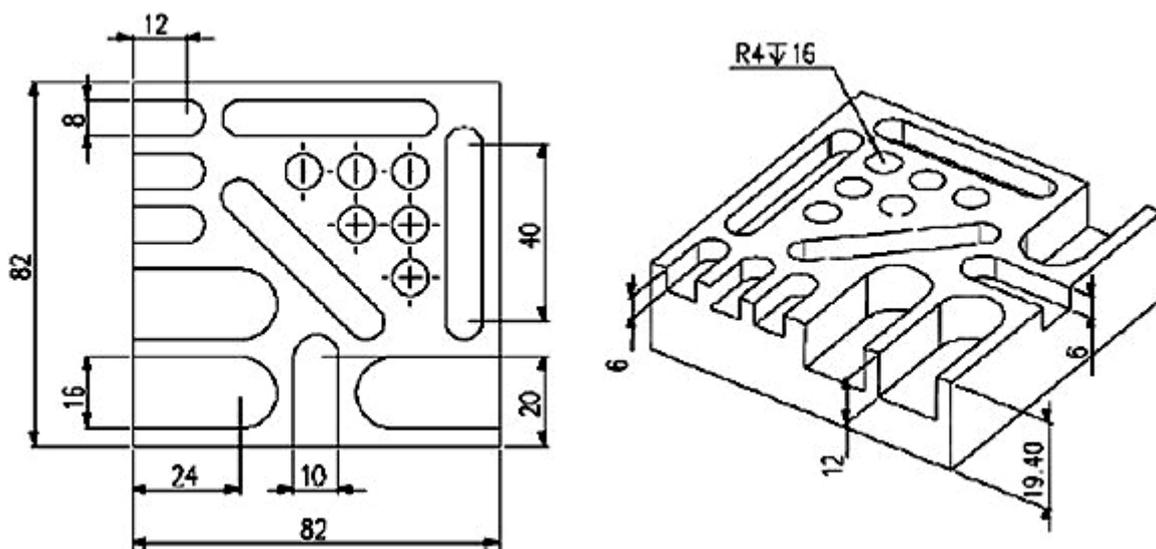


Abbildung 14: Testwerkstück nach Behrendt T. (Maße in mm)²²

Ein weiteres Beispiel für die Gestaltung eines Testwerkstückes nach Behrendt T. ist in Abbildung 14 zu sehen. Das Referenzstück besteht aus zahlreichen verschiedenen Nutengrößen und Bohrungen. Es werden mehrere verschiedene Fräswerkzeuge und ein Bohrer für die Bearbeitung benötigt. Durch diese Bedingung wird eine Werkzeugmaschine mit einem Werkzeugmagazin und Werkzeugwechsler gefordert. Konventionelle Fräsmaschinen, wo das Werkzeug mit der Hand gewechselt wird, werden somit aus diesem Prüfzyklus ausgeschlossen. Dieses Referenzstück besteht aus Stahl. Um verschiedene Maschinengrößen besser vergleichen zu können, unterteilt er die 3-Achsen Fräsmaschinen nach ihrem Arbeitsraum. Der Arbeitsraum wird durch die x- und y-Richtung aufgespannt. Die z-Richtung ist durch die Werkzeugspindel selbst definiert. Es werden 3 Arbeitsraumgrößen gewählt, unter 0.1 m^2 , zwischen 0.1 m^2 und 1 m^2 und über 1 m^2 . Durch diese Einteilung kann

²² <http://www.sciencedirect.com> (25.2.2014)

sichergestellt werden, dass größere und leistungsstärkere Fräsmaschinen für größere Bauteile nicht automatisch schlechter im Prüfzyklus abschneiden, als kleinere Fräsmaschinen. Kleinere Fräsmaschinen hätten sonst den Vorteil, dass sie effizienter bewertet werden, da ihre Komponenten und Baugruppen für die Bearbeitung des Testwerkstückes nicht überdimensioniert sind. Eine weitere Idee ist, das Testwerkstück für jede Arbeitsraumgröße nach ihrer geometrischen Größe zu skalieren. Die Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine besteht aus einem variablen und fixen Energieanteil. Der fixe Energieanteil wird dazu benötigt, dass die Maschine betriebsbereit ist. Kühlung, Hydraulik, Lüfter und andere Komponenten müssen permanent in Betrieb sein. Der variable Anteil besteht aus Zerspanungsenergie und aus zusätzlicher Komponentenenergie, welche sich erst beim Bearbeiten hinzuschalten. Vorschubmotoren und Schmierpumpen werden zum Beispiel erst dann mit Energie versorgt, wenn das CNC-Programm gestartet wird. Eine grafische Darstellung der Energieaufteilung ist in der Abbildung 15 zu sehen.²³

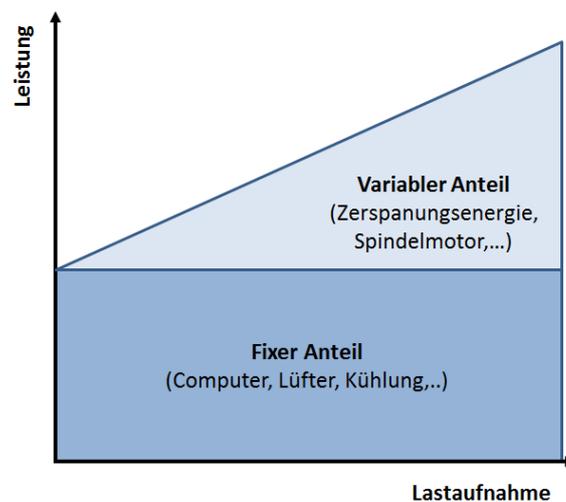


Abbildung 15: Fixer und variabler Energieanteil in einer Werkzeugmaschine

Eine deutsche Arbeitsgruppe für Energieeffizienz bei Werkzeugmaschinen, NC+ genannt, hat sich ebenfalls mit einem Referenzwerkstück beschäftigt. Bei diesem Werkstück werden Schlicht-, Schrupp- und Bohroperationen angewendet. Als Material wird GS45 gewählt. Die Gesamtdauer zum Fertigen des Bauteils beträgt über zwei Stunden. Ein Nachteil einer so langen Bearbeitungszeit ist, dass die anfallenden Messdaten sehr groß sind. Eine kürzere Bearbeitungszeit bringt den Vorteil, dass die Datenmengen kleiner werden. Damit können sie besser gehandhabt und ausgewertet werden. In Abbildung 16 ist das Referenzstück der Arbeitsgruppe NC+ abgebildet.²⁴

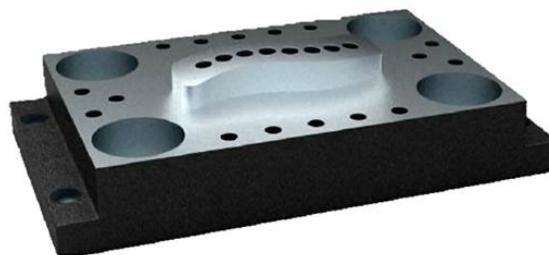


Abbildung 16: Referenzwerkstück laut Arbeitsgruppe NC+²⁵

²³ <http://www.sciencedirect.com> (25.2.2014)

^{24,25} <http://www.effizienzfabrik.de> (25.2.2014)

Die in dieser Arbeit durchgeführten Leistungsmessungen werden mit einem Referenzwerkstück nach Brillinger durchgeführt. Zuerst wird auf die geometrische Gestaltung des Testwerkstückes eingegangen. Diese Bachelorarbeit entstand parallel zu dieser Arbeit am Institut für Fertigungstechnik. Es wird ein Testwerkstück mit relativ einfacher Geometrie gewählt. Sie soll für Dreh- und Fräsmaschinen geeignet sein. Heutzutage ist durch die moderne CNC-Technik das Kombinieren von Fräs- und Drehoperationen soweit fortgeschritten, dass Bearbeitungszentren beide Aufgaben, Fräsen und Drehen, erfüllen. Außerdem müssen für einen Prüfzyklus die Anzahl der eingesetzten Peripheriekomponenten berücksichtigt werden. Unter Peripheriekomponenten versteht man die Anzahl der angetriebene Achsen, Hilfsachsen, Werkzeughalter, Werkzeugwechsler und andere Komponenten. Jede Werkzeugmaschine besitzt eine unterschiedliche Anzahl an Peripheriekomponenten. Dies wirkt sich auf die geometrische Gestaltung eines Testwerkstückes aus. Es wird ein Testwerkstück gewählt, welches sich nur in der Aufspannung unterscheidet. Es ist somit für Fräs- und Drehmaschinen geeignet. Des Weiteren wird eine Nassbearbeitung angewendet, damit Kühlschmierpumpen im Prüfzyklus mitberücksichtigt werden. Als Material wird 42CrMo4, ein Vergütungsstahl, gewählt, ein gängiger Werkstoff für die Herstellung von Bauteilen. In Abbildung 17 ist das Testwerkstück für eine Drehmaschine zu sehen. Die blaue Fläche entspricht der Aufnahme­fläche für das Backenfutter. Die grünen markierten Flächen stellen hingegen die Bearbeitungsflächen dar. Das Material wird in mehreren Bearbeitungsschritten von Durchmesser 90 mm auf Durchmesser 40 mm gedreht. Die Bohrung mit Durchmesser 14,5 mm soll eine Nebenachse im Prüfzyklus mitberücksichtigen.²⁶

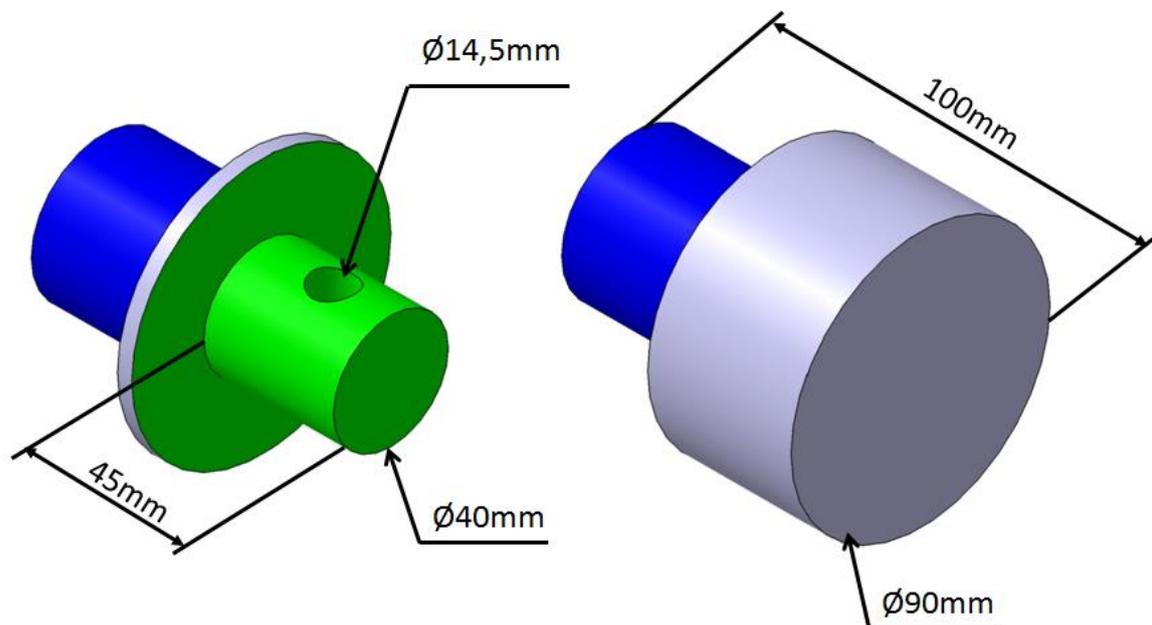


Abbildung 17: Testwerkstück für Drehmaschinen nach Brillinger M.

Für eine Fräsmaschine muss die Aufnahme­fläche eine eckige Form aufweisen, damit das Testwerkstück eingespannt werden kann. Dies ist in Abbildung 18 zu sehen, wo die blau markierten Aufspannungsflächen eckig dargestellt sind. Ob die vermessene Fräsmaschine die Querbohrung im Prüfzyklus mitbohren kann, hängt von der Maschine selbst ab. Beim Stufenfräsen von Durchmesser 90 mm auf Durchmesser 40 mm wird die Gesamtenergie der

²⁶ Vgl. Brillinger M. (2013)

Maschine mitgemessen. Das Zeitspanungsvolumen wird variiert und dient als Grundlage für die Vergleichbarkeit von Werkzeugmaschinen.

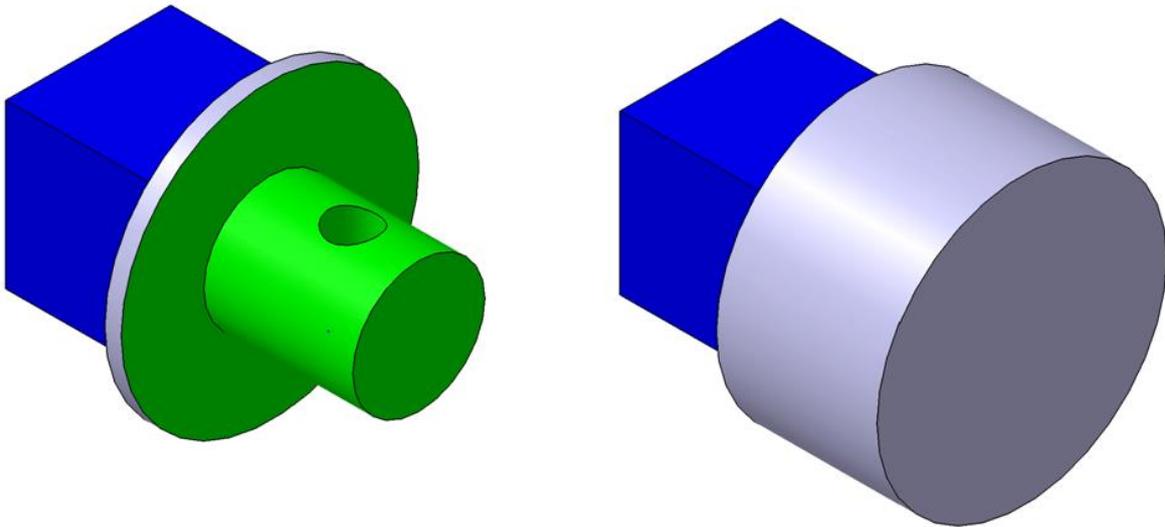


Abbildung 18: Testwerkstück für Fräsmaschinen nach Brillinger M.

Nach der geometrischen Definition des Bauteils werden die Zerspanungsparameter definiert. Die wichtigsten Kenngrößen für die Vergleichbarkeit von spanenden Werkzeugmaschinen sind das Zeitspanungsvolumen Q und die dazu gehörige gemessene Wirkleistung P . Über die Wirkleistung kann auf die benötigte Energiemenge der gesamten Maschine zurückgeschlossen werden. Ebenfalls kann für jedes spezifische Zeitspanungsvolumen die dazugehörige Energie abgelesen werden. Es werden die einzelnen Prozessparameter für die Dreh- und Bohrbearbeitung erläutert.²⁷

- *Schnitttiefe a_p*
Die Zustellung des Drehmeißels in das Werkstück wird als Schnitttiefe bezeichnet.
- *Vorschub f*
Der Vorschub des Drehmeißels ist abhängig von der Bearbeitung. Er wird in mm/U angegeben, d.h. wieviel Millimeter bewegt sich der Drehmeißel pro Umdrehung in Längsrichtung.
- *Schnittgeschwindigkeit v_c*
Die Schnittgeschwindigkeit ist jene Geschwindigkeit, wo der Span auf die Werkzeugschneide in Umfangsrichtung auftrifft. Sie wird vom Durchmesser und von der Drehzahl der Spindel beeinflusst (siehe Formel 10). Für den Prüfzyklus wird sie auf 150m/min konstant gehalten.
- *Zeitspanungsvolumen Q*
Das Zeitspanungsvolumen sagt aus, wieviel Material vom Werkstück innerhalb einer Sekunde abgetragen wird. Hier spielen Vorschubgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe eine wesentliche Rolle. Je höher die Abtragsrate ist, desto wirtschaftlicher und kostengünstiger ist die Fertigung. Jedoch steigt auch der

²⁷ Vgl. Paucksch, E. et al. (2008), S.126f

Werkzeugverschleiß stark an. Beim Außendrehen ist das Zeitspannungsvolumen folgendermaßen definiert:

$$Q = A \cdot v_c \text{ [mm}^3\text{/s]} \quad (8)$$

$$A = f \cdot a_p \text{ [mm}^2\text{]} \quad (9)$$

$$v_c = \pi \cdot \frac{(d_a + a_p) \cdot n}{60} \text{ [mm/s]} \quad (10)$$

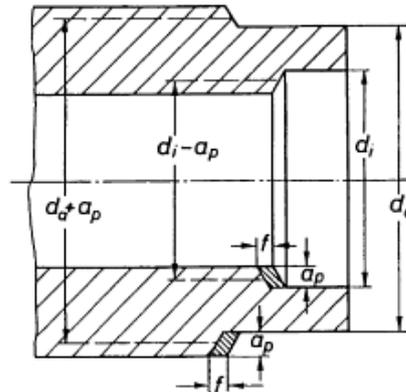


Abbildung 19: Zerspanungsparameter beim Außen- und Innendrehen²⁸

In Abbildung 19 sind die geometrischen Einflussgrößen beim Außen- und Innendrehen dargestellt. In der nachfolgende Tabelle 1 sind Zerspanungsparameter für die einzelnen Stufen beim Längsdrehen des Testwerkstückes aufgelistet.

Tabelle 1: Zerspanungsparameter für das Testwerkstück

Nr.	a_p	f	v_c	d_a	Q
	[mm]	[mm/U]	[m/min]	[mm]	[mm ³ /s]
1	5	0,3	150	80	3750
2	5	0,3	150	70	3750
3	4,5	0,3	150	61	3375
4	4	0,3	150	53	3000
5	3	0,3	150	47	2250
6	2	0,3	150	43	1500
7	1	0,3	150	41	750
8	0,5	0,3	150	40	375

Die ersten beiden Stufen betragen 5 mm. Dies hat den einfachen Grund, dass beim Rohmaterial eine Walzhaut vorhanden ist. Durch die Walzhaut kommt es zu größeren

²⁸ Vgl. Paucksch, E. et al. (2008), S.126f

Schwingungen und Rattermarken während der Bearbeitung. Damit kann man beim Längsdrehen beobachten, wie groß dieser Einfluss auf die Leistungsaufnahme ist. Für die Auswertung werden die Stufen 2 bis 8 herangezogen, um den Einfluss der Walzhaut auszuschließen. Heutzutage besitzen viele CNC-Bearbeitungszentren mehrere Hilfsachsen. Die Bohrung soll im Prüfzyklus eine zusätzliche Hilfsspindel mitberücksichtigen. Für die seitliche Bohrung im Referenzwerkstück müssen noch deren Prozessparameter definiert werden.

Als Berechnungsgrundlage für das Zerspanungsvolumen beim Bohren dient Formel 11:

$$Q_{Bohren} = A_f \cdot v_f [mm^3/s] \quad (11)$$

Die Querschnittsfläche A_f ergibt sich durch den Kreisquerschnitt des Bohrers:

$$A_f = \frac{d_{Bohrer}^2 \cdot \pi}{4} [mm^2] \quad (12)$$

Die Vorschubgeschwindigkeit v_f wird durch die Vorschubgeschwindigkeit pro Zahn f_z , Zähnezahl z und die Drehzahl n definiert:

$$v_f = f_z \cdot z \cdot n \quad (13)$$

Werden die Formeln 12 und 13 in Formel 11 eingesetzt so erhält man folgende Formel für das Zeitspanvolumen:

$$Q = \frac{d_{Bohrer}^2 \cdot \pi}{4} \cdot f_z \cdot z \cdot n \quad (14)$$

Es wird beim Testwerkstück eine Bohrung mit einem Wendelnutenbohrer durchgeführt. Die vollständigen Prozessparameter sind aus Tabelle 2 ersichtlich.

Tabelle 2: Bohrparameter

Nr.	f	v_f	d_{Bohrer}	Q_{Bohren}
	[mm/U]	[m/min]	[mm]	[mm ³ /s]
1	0,100	15	16	100

Die Bearbeitungsparameter für das Herstellen des Testwerkstückes sind vollständig erläutert und definiert worden. Damit können Leistungsmessungen an beiden den eingangs erwähnten Drehmaschinen durchgeführt werden.

5.4. Die Leistungsmessung

Im folgenden Kapitel werden die Leistungsmessungen an zwei CNC-Drehbearbeitungszentren erläutert. Bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus Maschine werden mehrere Komponenten vermessen. Meistens verfügen Werkzeugmaschinen über eine größere Anzahl von Hilfsantrieben und angetriebenen Werkzeugen. Alle Komponenten einer Maschine zu vermessen ist aufwändig und zeitintensiv. Deshalb sollen jene Komponenten leistungsvermessen werden, die für die Bearbeitung des Testwerkstückes benötigt werden. Es soll ein Grundverständnis geschaffen werden, um zu sehen, bei welchen Komponenten und in welcher Höhe Energie verbraucht wird. Mit dem Leistungsmessgerät können zwei Komponenten gleichzeitig gemessen werden. Es wird immer die Gesamtleistung der Maschine, ihre Versorgungsleitungen und die zu untersuchende Komponente gemessen. Es soll damit sichergestellt werden, dass eine zeitliche Zuordnung beider Messungen für die Auswertung gegeben ist. Nach den Leistungsmessungen der Komponenten erfolgt eine Auswertung nach Gontarz A., Hänni F., Weiss L. und Wegener K.²⁹ Dabei wird eine Vergleichsgröße, der Retrofit Faktor, für die Komponenten ausgerechnet. Dieser Faktor ist eine Hilfsgröße und sagt aus, ob die Komponente oder Baugruppe für das herzustellende Bauteil überdimensioniert ist oder nicht. Als Bauteil für die Leistungsmessungen wird das in Kapitel 5.3 beschriebene Referenzwerkstück nach Brillinger verwendet. Sind die betrachteten Komponenten überdimensioniert, so können Überlegungen getroffen werden, ob die Komponenten gegen neuere, effizientere ausgetauscht werden sollen. Des Weiteren kann mit Hilfe der Leistungsmessung der Hauptspindel auf die Zerspanungsenergie zurückgerechnet werden. Hier soll ein Vergleich mit einer zweiten Maschine stattfinden. Als zweite Werkzeugmaschine dient die Voest Weipert-WNC500S. Bei dieser Werkzeugmaschine wird ebenfalls die Gesamt- und die Hauptspindelleistung gemessen, damit ein direkter Vergleich zwischen ihr und der EMCO Hyperturn-665MCPlus gezogen werden kann.

5.4.1. Gesamtleistung der EMCO Hyperturn-665MCPlus

In der Bachelorarbeit von Brillinger wird die Gesamtleistung der Maschine und die Leistungsaufnahme der Frässpindel dargestellt und interpretiert. Hier sollen die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst werden. In Abbildung 20 ist der zeitliche Leistungsverlauf der Maschine in der roten Messkurve dargestellt. Der gelb markierte Bereich stellt die Grundlast dar. Man spricht hier auch von der StandBy-Leistung. Diese Leistungsaufnahme ist notwendig, damit die Maschine für eine Bearbeitung betriebsbereit ist. Hydraulik, Computer, Lüfter und andere Komponenten werden zum Beispiel in dieser Phase mit Strom versorgt. Die StandBy-Leistung beträgt zirka 3 kW. Außerdem sind gleichmäßige periodische Schwankungen im Verlauf zu erkennen. Diese werden von der Hydraulik verursacht. Die Hydraulik dient zum Aufbauen des Öldruckes, welcher zum Beispiel für das Spannen des Backenfutters oder für die hydrostatischen Lager in den Spindeln benötigt wird. Im blau markierten Bereich schaltet sich der Lüfter des Kühlaggregates ein. Dieser schaltet sich zirka alle 10-15 min ein und läuft bis zu 3 min. Der Lüfter hat die Aufgabe, die Wärme im Kühlmittel über einen Wärmetauscher abzutransportieren. Ist der Lüfter eingeschaltet, so steigt die Leistungsaufnahme auf zirka 5.5 kW.

²⁹ <http://e-collection.library.ethz.ch> (25.2.2014)

Leistungsaufnahme EMCO-Hyperturn 665MCplus

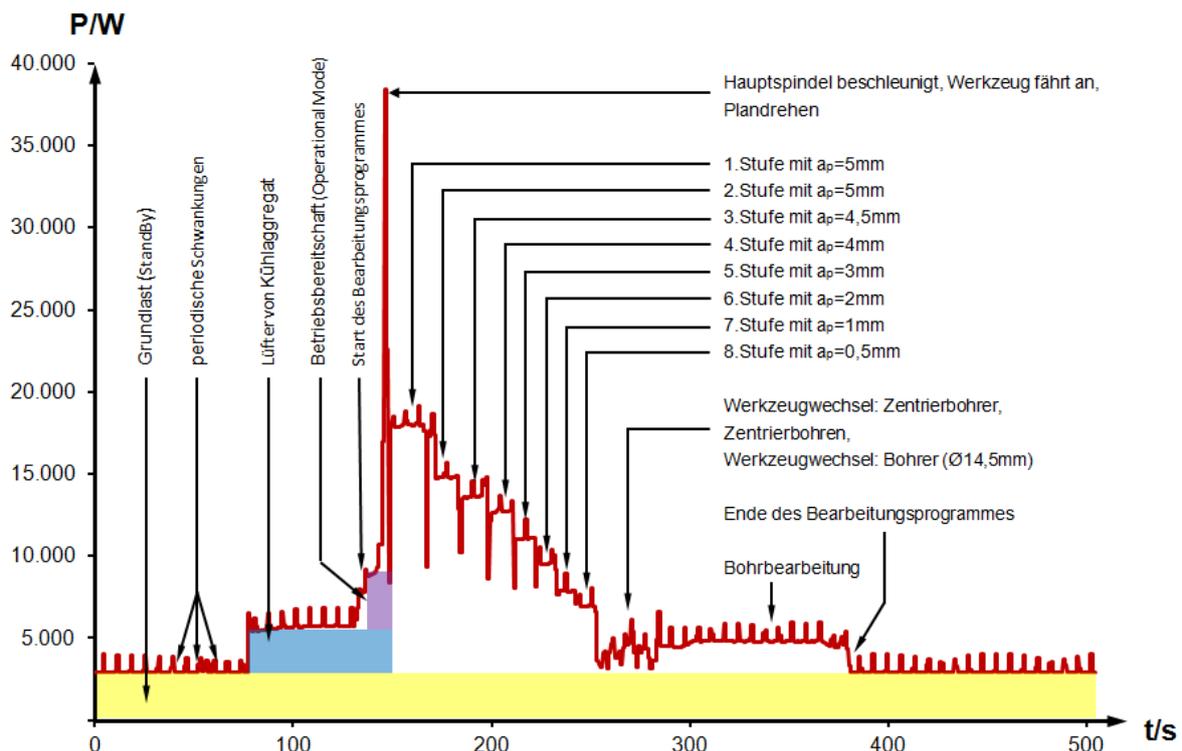


Abbildung 20: Gesamtleistungsaufnahme der EMCO Hyperturn-665MCplus

Zu Beginn des CNC-Programmes wird die Maschine in den Operational-Mode versetzt. Hier werden zusätzliche Komponenten, wie Spindeln und Vorschubantriebe, mit Energie versorgt. Beim Starten des Programmes wird beim Testwerkstück die Frontseite plangedreht. Hier beschleunigt die Hauptspindel immer schneller, je weiter sich das Werkzeug dem Mittelpunkt nähert. Der Grund liegt darin, dass die Schnittgeschwindigkeit konstant gehalten wird. Durch die Abnahme des Radius muss die Drehzahl steigen, damit die konstante Schnittgeschwindigkeit eingehalten werden kann. Beim Plandrehen wird mit Kühlschmierstoff (KSS) gekühlt. In der Leistungskurve ist das Plandrehen mit einer Leistungsspitze von zirka 38,5 kW zu erkennen. Im Weiteren ist zu erkennen, dass die Leistungskurve stufenartig abnimmt. Hier werden die acht unterschiedlichen Stufen mit verschiedenen Zerspanungsvolumen längsgedreht (1.Stufe bis 8.Stufe im Diagramm). Auch beim Längsdrehen ist die Kühlschmierstoffpumpe aktiv. Im Weiteren wird ein Zentrierbohrer eingewechselt, damit die Bohrung in der Welle vorzentriert werden kann. Nach einem erneuten Werkzeugwechsel, wird der Bohrer $\varnothing 14,5\text{ mm}$ eingewechselt. Durch den gering gewählten Bohrvorschub ergibt sich eine längere Bohrdauer und ein geringerer Leistungsanstieg. Gleichzeitig wird der Bohrvorgang mit KSS gekühlt, damit die Späne abgeführt werden und die Bohrschneide gekühlt wird. Am Ende des CNC-Programmes fährt die Frässpindel mit eingespanntem Bohrer in den Ausgangszustand zurück, und die Maschine wird in den StandBy-Modus versetzt.³⁰

³⁰ Vgl. Brillinger M. (2013)

5.4.2. Frässpindel der EMCO Hyperturn-665MCPlus

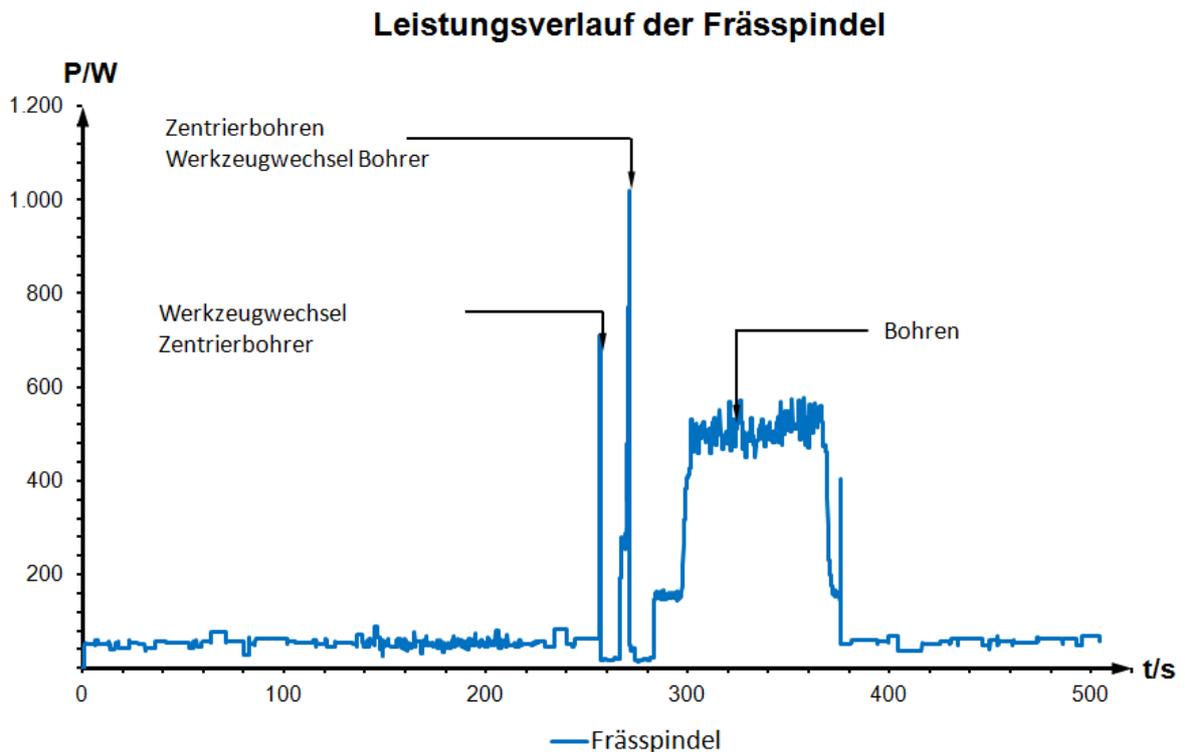


Abbildung 21: Leistungsverlauf der Frässpindel bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die Frässpindel dient im Prüfzyklus zum Zentrierbohren und zum Bohren des Kernloches im Testwerkstück. In Anhang A11 sind die zeitlichen Leistungsverläufe der Frässpindel und der Gesamtleistung dargestellt. Eine Leistungsmessung einer Komponente erfolgt wie bereits erwähnt immer mit der Gesamtleistung. Damit eine Auswertung in den nachfolgenden Kapiteln 5.4.14 und 5.4.15 für den Retrofit Faktor und der Zerspanungsenergie erfolgen kann, ist immer eine gleichzeitige Messung beider Verläufe notwendig. In Anhang A11 ist im Diagramm zu sehen, dass die Leistungsaufnahme der Frässpindel im Vergleich zur Gesamtleistung der Maschine sehr gering ist. In Abbildung 21 ist der Leistungsverlauf der Frässpindel dargestellt.

Beim Werkzeugwechsel zum Zentrierbohrer wird das Werkzeug in der Frässpindel verriegelt. Es kommt zu einer kurzzeitigen ruckartigen Bewegung, welche in der ersten Leistungsspitze zu sehen ist. Die zweite Leistungsspitze kommt beim wiederholten Vorgang beim Zentrieren und beim Wechseln zum Bohrer zustande. Die Leistungsaufnahme der Frässpindel steigt beim Bohren auf zirka 500 Watt. Im StandBy-Betrieb nimmt die Komponente eine Leistung von zirka 75 Watt auf.³¹

5.4.3. Hydraulik der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die Hydraulikpumpe dient zum Betätigen der Druckventile in der Werkzeugmaschine. Sie muss einen konstant hohen Druck zur Verfügung stellen. Der hohe Öldruck wird zum Beispiel für die hydrostatischen Lager in der Haupt- und Nebenspindel benötigt. Auch zum Schließen und Öffnen der Werkzeugverriegelungen und zum Betätigen des Backenfutters

³¹ Vgl. Brillinger M. (2013)

wird die Hydraulikpumpe benötigt. In Anhang A12 sind die Leistungskurven der Gesamtmaschine und der Hydraulikpumpe dargestellt. Man erkennt, dass die Hydraulik einen periodisch schwankenden Leistungsverlauf besitzt. Im Vergleich zu anderen Komponenten in der Maschine benötigt die Hydraulik eine größere Leistungsaufnahme. Im Allgemeinen besitzen Komponenten mit einer größeren Leistungsaufnahme auch ein größeres Einsparpotenzial.

In Abbildung 22 ist der periodisch schwankende Leistungsverlauf der Ölpumpe dargestellt. Man erkennt, dass der Verlauf hohe und tiefe Spitzen aufweist. Diese treten schnell hintereinander auf. Die Leistungsspitzen erfolgen alle 7 Sekunden, d.h. die Pumpe schaltet sich alle 7 Sekunden ein und dann wieder aus.

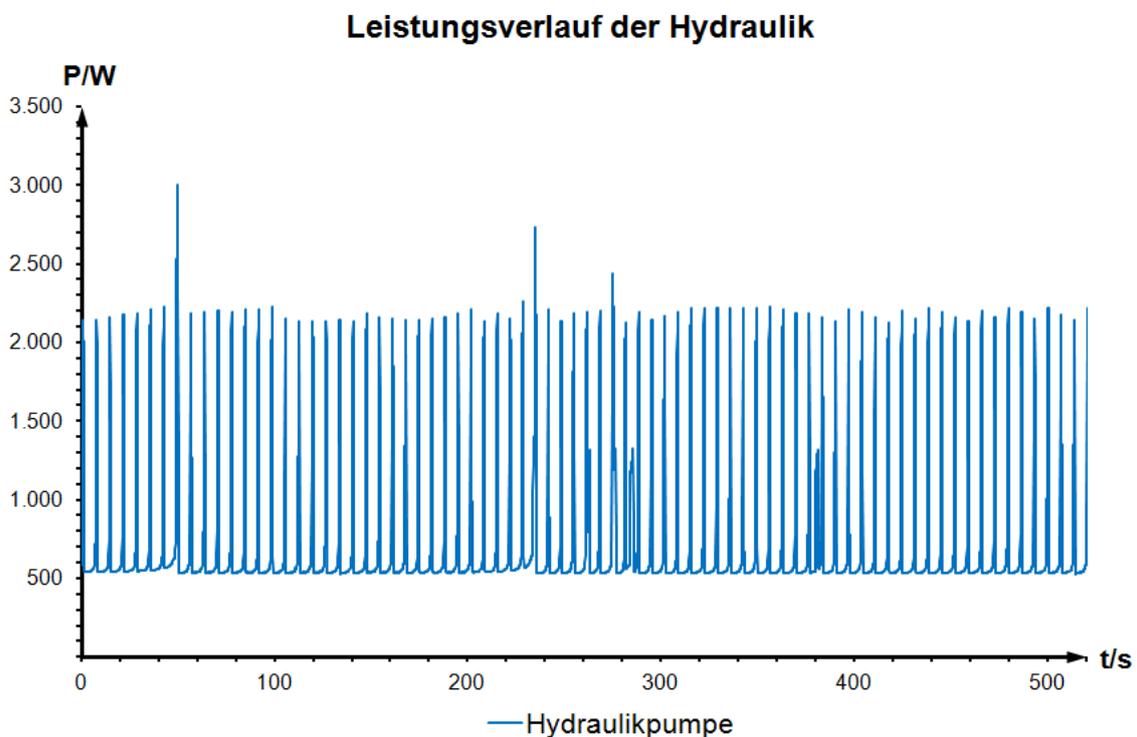


Abbildung 22: Leistungsverlauf der Hydraulik bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die durchschnittliche Leistungsspitze beträgt zirka 2200 Watt, welche der Nennleistung der Pumpe von 2.2 kW entspricht. Im Ruhezustand, zwischen dem Aus- und Einschalten, benötigt die Pumpe zirka 550 Watt. Die Hydraulikpumpe arbeitet im Speicherladebetrieb. Die Pumpe baut im Druckspeicher einen Druck von 60 bar auf. Sobald der Druck abfällt schaltet sich die Pumpe wieder an und baut den Druck wieder auf. Im Gegensatz zum Umlaufbetrieb einer Pumpe, wird der überschüssige Volumenstrom über ein Drosselventil nicht zurück in den Öltank gepumpt. Die überschüssige Energie im Umlaufbetrieb wird im Tank in Wärme umgewandelt und führt dadurch zur Erwärmung der Maschine. Das Öl muss mehr gekühlt werden, damit die Thermostabilität der Werkzeugmaschine gegeben ist. Im Speicherladebetrieb kann durch die effiziente Gestaltung des Hydrauliksystems eine große Menge an Energie eingespart werden.

5.4.4. B-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus

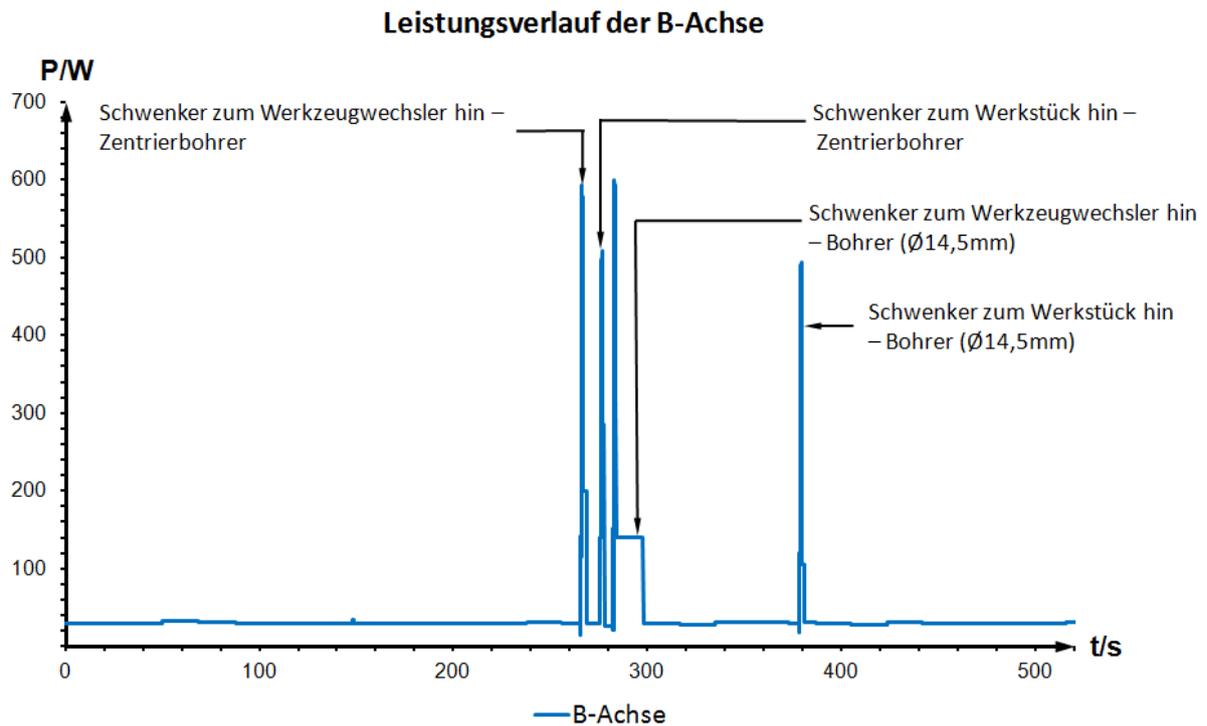


Abbildung 23: Leistungsverlauf der B-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die B-Achse dient zum Schwenken des Fräsblocks mit der Frässpindel. Ihre Achse lässt sich um 210° im Arbeitsraum schwenken (siehe Abbildung 24). Sie wird für die Bearbeitung im Prüfzyklus benötigt. In Anhang A13 sind die Leistungskurven von der B-Achse und der Gesamtleistung in einem Diagramm abgebildet. Ihr Anteil an der Gesamtleistung ist sehr gering. Damit lässt sich bereits erkennen, dass diese Komponente ein geringes Einsparpotenzial aufweist. Es muss aber beachtet werden, dass in diesem Prüfzyklus ein Testwerkstück bearbeitet wird, welches nur über eine Bohrung verfügt. Diese Energieaufteilung kann bei anderen Werkstücken jedoch anders aussehen. In Abbildung 23 sieht man den Leistungsverlauf der B-Achse. Im StandBy-Modus braucht die Komponente eine Leistung von nur zirka 35 Watt. Die ersten beiden Leistungsspitzen können folgendermaßen interpretiert werden. Beim Werkzeugwechsel zum Zentrierbohrer muss die Frässpindel zum Werkzeugwechsler geschwenkt werden. Hat die Frässpindel den Zentrierbohrer aufgenommen, so schwenkt sie um 90° Grad zurück zum Testwerkstück. Nach dem Zentrieren wird der Bohrer aufgenommen und es wird gebohrt. So entstehen die letzten beiden Leistungsspitzen im Verlauf.

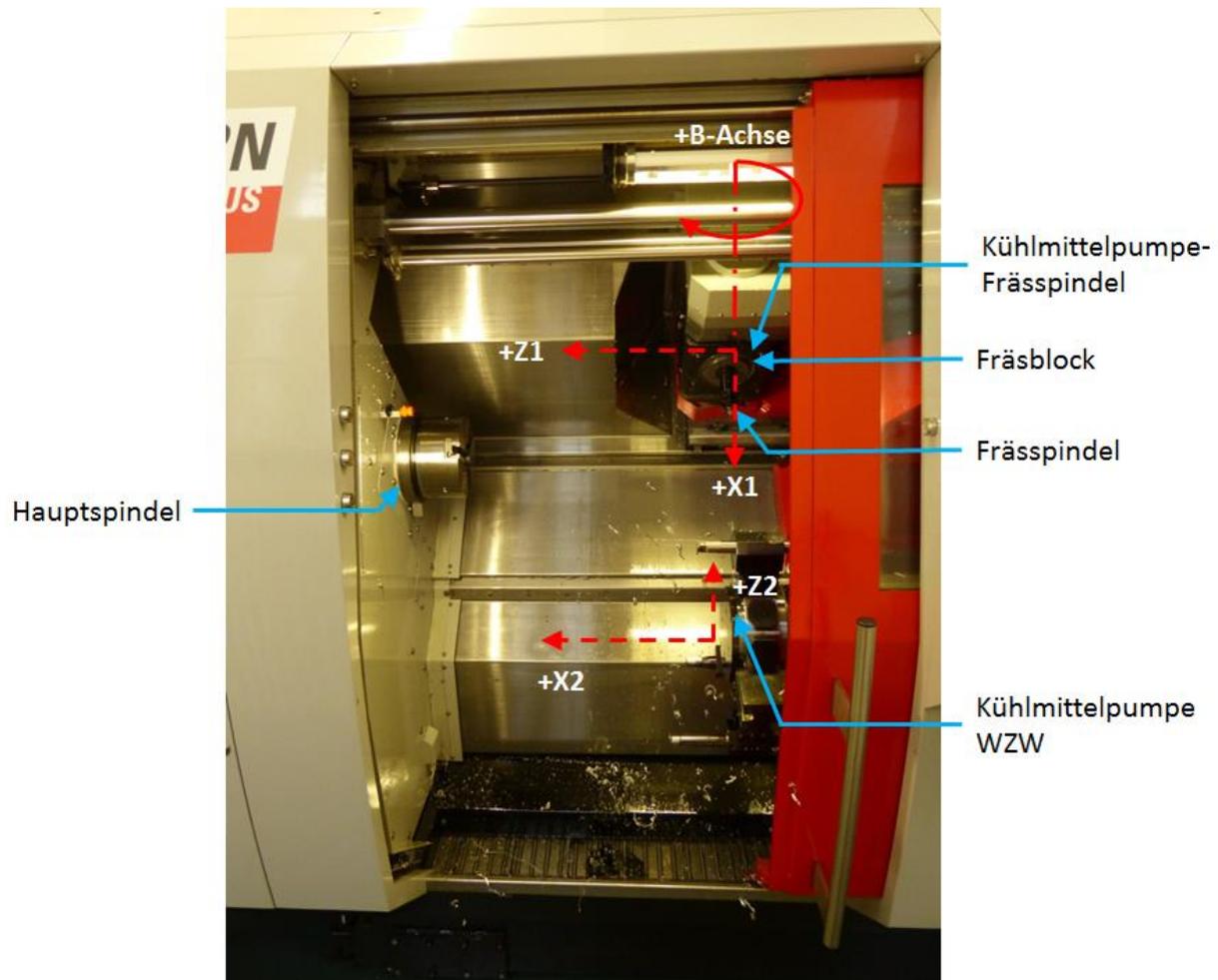


Abbildung 24: Komponenten und Hilfsachsen der EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.4.5. Werkzeugmagazin der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Im Werkzeugmagazin können bis zu 24 verschiedene Werkzeuge verwaltet werden. Diese können von der Frässpindel mit Hilfe eines Werkzeugwechslers aufgenommen werden. Durch den großen Werkzeugspeicher kann eine hohe Bearbeitungsflexibilität sichergestellt werden. Im Prüfzyklus werden zwei Werkzeuge, ein Zentrierbohrer und ein Bohrer ($\text{\O}14,5 \text{ mm}$) im Speicher verwaltet. In Anhang A14 ist deutlich zu sehen, dass der Leistungsanteil des Werkzeugmagazins an der Gesamtenergie sehr gering ist. In Abbildung 25 ist die Leistungskurve des Werkzeugmagazins alleine dargestellt. Im ganzen Bearbeitungszyklus wird das Magazin nur einmal zum Wechseln des Zentrierbohrers zum Bohrer benötigt. Die Frässpindel nimmt den Zentrierbohrer auf und zentriert am Werkstück. Danach fährt die Frässpindel zum Werkzeugspeicher zurück, um zum Bohrer zu wechseln. Hier fährt der Speicher um eine Position weiter, damit die Frässpindel auf den Bohrer wechseln kann. Die auftretende Leistungsspitze ist im Diagramm zu sehen und beträgt zirka 150 Watt. Im StandBy-Modus ist die Ruheleistungsaufnahme gering und beträgt zirka 25 bis 40 Watt.

Leistungsverlauf des Werkzeugmagazins

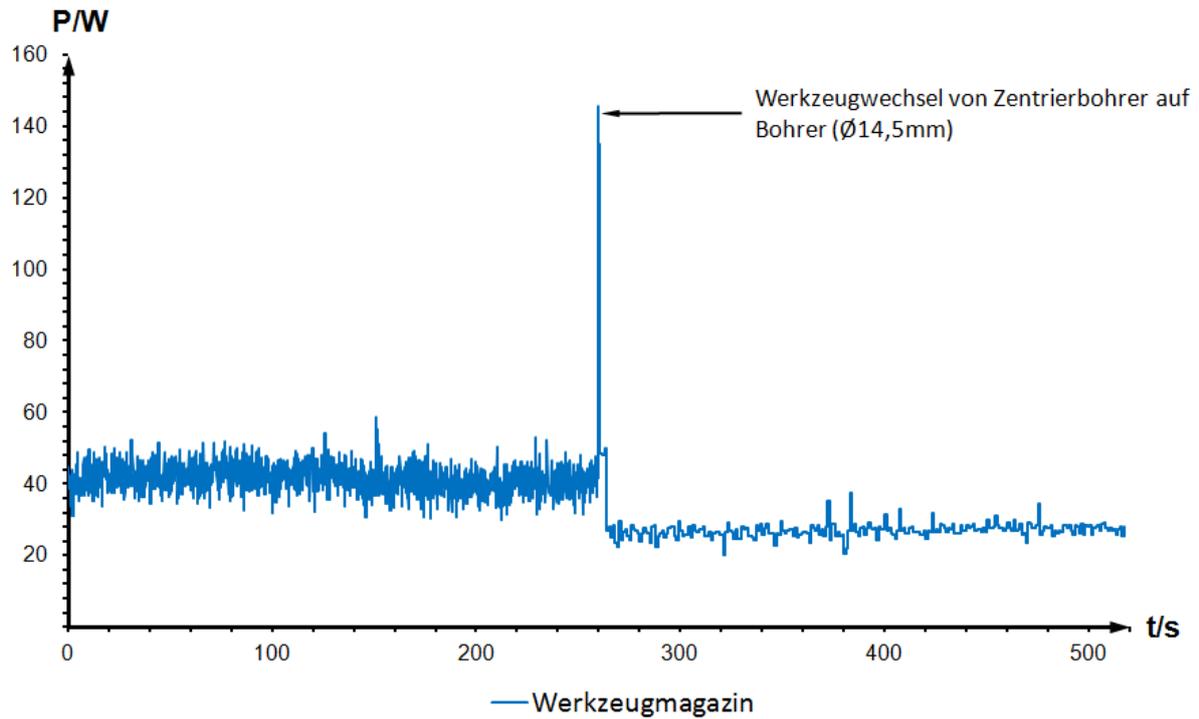


Abbildung 25: Leistungsverlauf des Werkzeugmagazins bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.4.6. Kühlmittelpumpe-WZW der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Leistungsaufverlauf der Kühlmittelpumpe-WZW

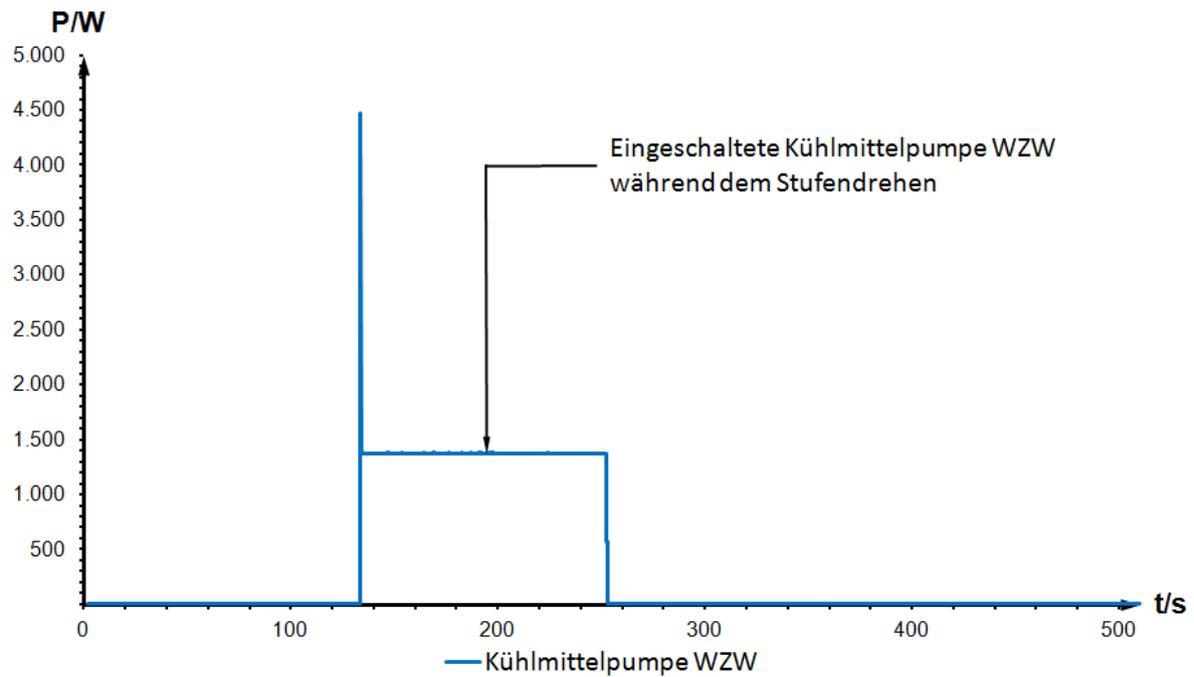


Abbildung 26: Leistungsverlauf der Kühlmittelpumpe-WZW bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die Kühlmittelpumpe-Werkzeugwender (WZW) spritzt Kühlschmiermittel aus dem unteren Werkzeugrevolver, wo sich der Drehmeißel befindet, auf das Werkstück. Die Schmierung ist notwendig, damit der Span leichter von der Werkzeugschneide abfließen kann. Die Standzeitfestigkeit des Werkzeugs wird dadurch erhöht.

Das Kühlmittel hat die Aufgabe, die entstehende Prozesswärme zwischen Werkstück und Werkzeug abzuführen. Die hohe Prozesswärme wirkt sich negativ auf die Standzeit des Werkzeuges aus und es kann zu unerwünschten Gefügeänderungen am Werkstück kommen. Die Leistungsmessung von der Kühlmittelpumpe-WZW ist in Anhang A15 abgebildet. Während der Fertigung des Testwerkstückes ist die Kühlmittelpumpe nur im Bereich des Drehens aktiv. In dieser Zeit nimmt die Pumpe eine große Leistung auf. Auf der vorherigen Seite, in Abbildung 26, ist der Leistungsverlauf der Kühlmittelpumpe-WZW dargestellt. Im StandBy-Modus wird die Pumpe nicht mit Energie versorgt. Erst beim Plan- und Längsdrehen wird sie mit Strom versorgt. Beim Anfahren entsteht kurz eine große Leistungsspitze von zirka 4.500 Watt. Der Grund liegt darin, dass der Motor für die Pumpe aus dem Stillstand auf die Nenndrehzahl beschleunigt. Nachdem er beschleunigt hat, ist ihr Leistungsverbrauch konstant und beträgt zirka 1.400 Watt.

5.4.7. Kühlmittelpumpe-Frässpindel der EMCO Hyperturn-665MCplus

Leistungsaufverlauf der Kühlmittelpumpe-Frässpindel

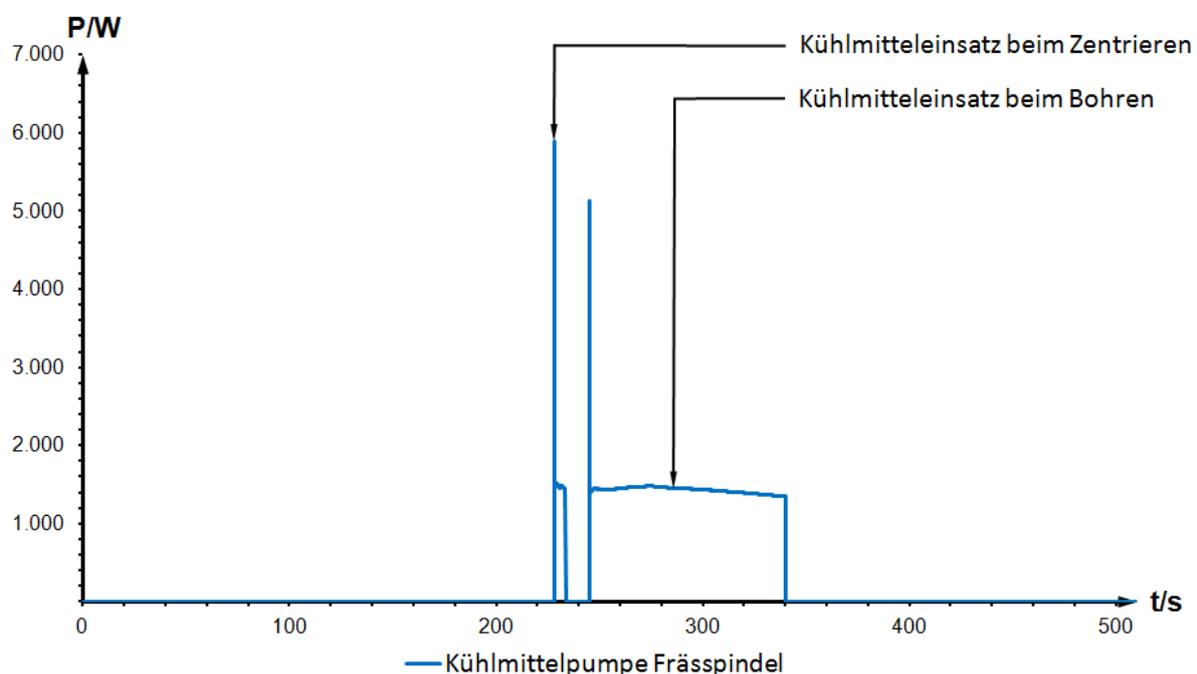


Abbildung 27: Leistungsverlauf der Kühlmittelpumpe-Frässpindel bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Damit Späne aus Bohrungen gespült werden können, gibt es eine Kühlschmiermittelpumpe für die Frässpindel. Diese stellt sicher, dass bei Fräs- und Bohroperationen die entstehende Prozesswärme abgeführt werden kann. Der Austritt des Kühlschmierstoffes erfolgt aus dem Fräsblock. Die Kühlmittelpumpe aus dem Werkzeugwender würde mit ihrem Flüssigkeitsstrahl den Bohrer und die Bohrung nicht treffen. Im Prüfzyklus ist die Pumpe nur während des Zentrierens und Bohrens aktiv. In dieser Zeit ist der Leistungsanteil zur

Gesamtleistung signifikant (siehe Anhang A16). Beim Anfahren der Pumpe entstehen Leistungsspitzen von zirka 6.000 Watt während im Betrieb der Verbrauch auf 1.500 Watt zurück geht (siehe Abbildung 27). Wie die Kühlmittelpumpe-WZW verbraucht auch sie keine Energie im StandBy-Modus. Durch Überlegungen für eine Trockenbearbeitung kann auf den Einsatz von Kühlmittelpumpen verzichtet werden. Damit lässt sich ein nicht zu vernachlässigender Energieanteil, bezogen auf die Gesamtenergie, einsparen.

In Abbildung 28a) und 28b) sind die Austritte des Kühlschmiermittels aus dem Werkzeugwender und aus dem Fräsblock in einem Luftschnitt illustriert. Bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus gibt es zwei zusätzliche Kühlschmiermittelpumpen. Je eine für die Haupt- und eine für die Gegenspindel. Diese sind im Prüfzyklus nicht miteinbezogen worden, da die Kühlschmiermittelversorgung aus dem Werkzeugwender und Fräsblock mehr als ausreichend sind.

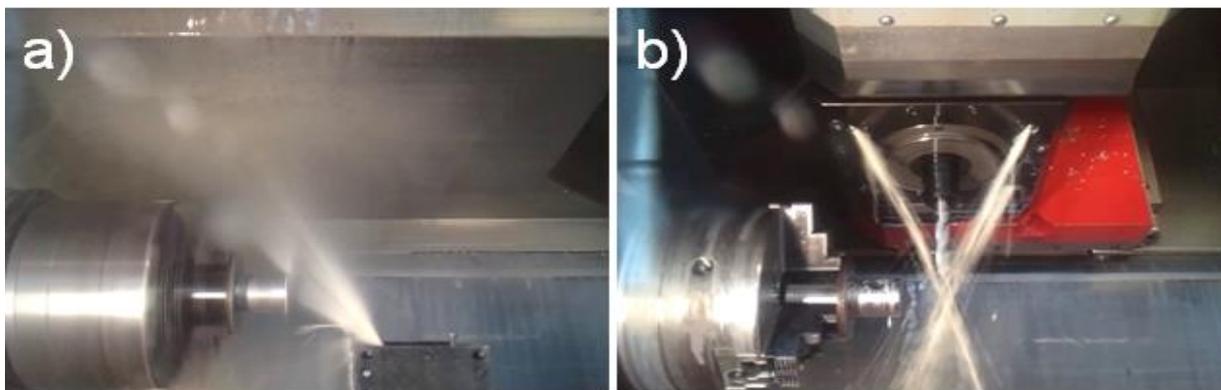


Abbildung 28: Kühlmittelaustritt a) Werkzeugwender b) Fräsblock

5.4.8. Kühlaggregat der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Leistungsverlauf des Kühlaggregates

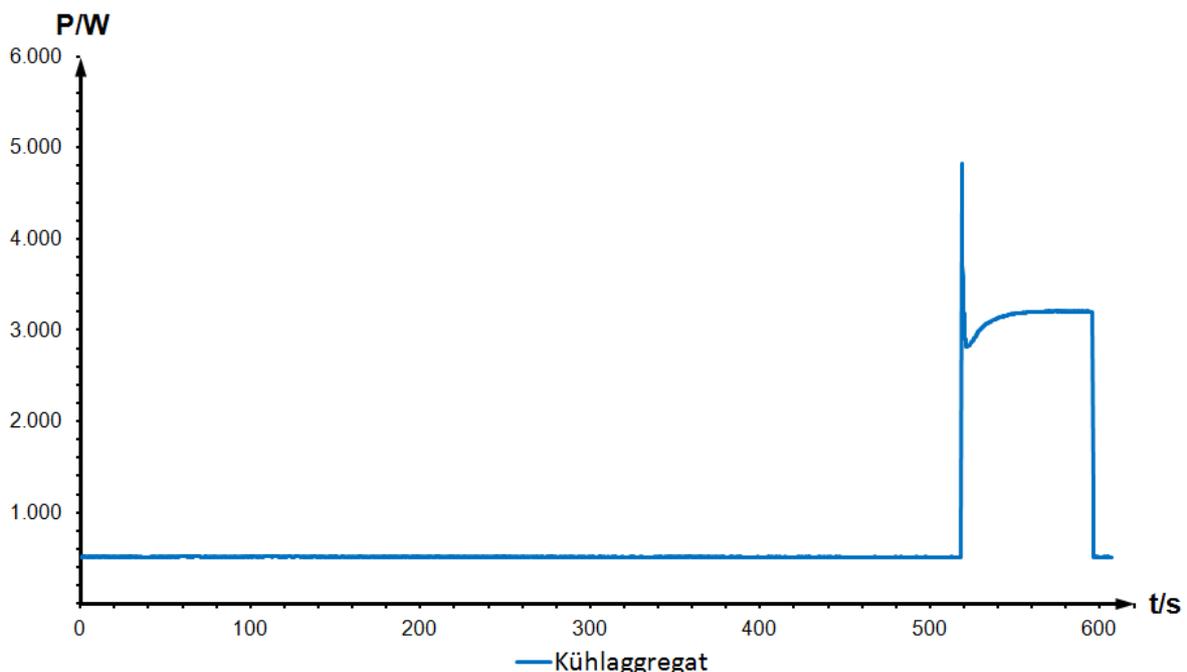


Abbildung 29: Leistungsverlauf des Kühlaggregates bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Das Kühlaggregat hat die Aufgabe die Haupt-, Gegen- und Hilfsspindeln zu kühlen. Die in der Werkzeugmaschine verbauten Spindeln sind Hohlwellenmotoren, welche flüssigkeitsgekühlt sind. Nur so kann die Thermostabilität für die hohe Fertigungsgenauigkeit eingehalten werden. Würde sich die Spindel aufgrund der Lagerreibungen und der entstehenden Prozesswärme ausdehnen, so würde sich auch das Werkstück verschieben. Der Drehmeißel würde eine andere Bahn im Werkstück abfahren, und es würde zu Maßabweichungen kommen. Deshalb müssen die Motoren gekühlt werden. Das Kühlaggregat hat eine konstante Leistungsaufnahme von 500 Watt und ist im Vergleich zur Gesamtleistung der Maschine nicht zu vernachlässigen (Anhang A17). In Abbildung 29 ist ein sprunghafter Anstieg im Leistungsverlauf zu sehen. Erwärmt sich die Kühlflüssigkeit auf einen bestimmten Wert, so schaltet sich ein Lüfter im Kühlaggregat ein. Dieser kühlt die Flüssigkeit auf 3°C über der Raumtemperatur herunter. So steigt der Leistungsverbrauch des Kühlaggregates auf über 3.000 Watt während der Lüfter in Betrieb ist.

5.4.9. X1-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die X1-Achse ist der Vorschubantrieb des Fräsblocks in x-Richtung (siehe Seite 34 in Abbildung 24). Anhang A18 zeigt, dass die Leistungsaufnahme der X1-Achse im Prüfzyklus kaum ins Gewicht fällt. Sie führt ruckartige und schnelle Bewegungen aus. Deshalb kommen die Leistungsspitzen, zu sehen in Abbildung 30, zustande. Beim Zentrieren und Bohren fährt der Fräsblock zwischen Werkstück und Werkzeugmagazin hin und her. Während des Bohrvorgangs sinkt interessanterweise die Leistungsaufnahme im Vergleich zum StandBy-Modus. Der Grund liegt darin, dass im Motor die elektromagnetische Haltebremse eine höhere Leistungsaufnahme aufweist, als beim Bohren. Beim Bohren beträgt die Durchschnittsleistung etwa 130 Watt. Die letzte Leistungsspitze entsteht durch die rasche Bewegung zurück in die Ausgangsstellung.

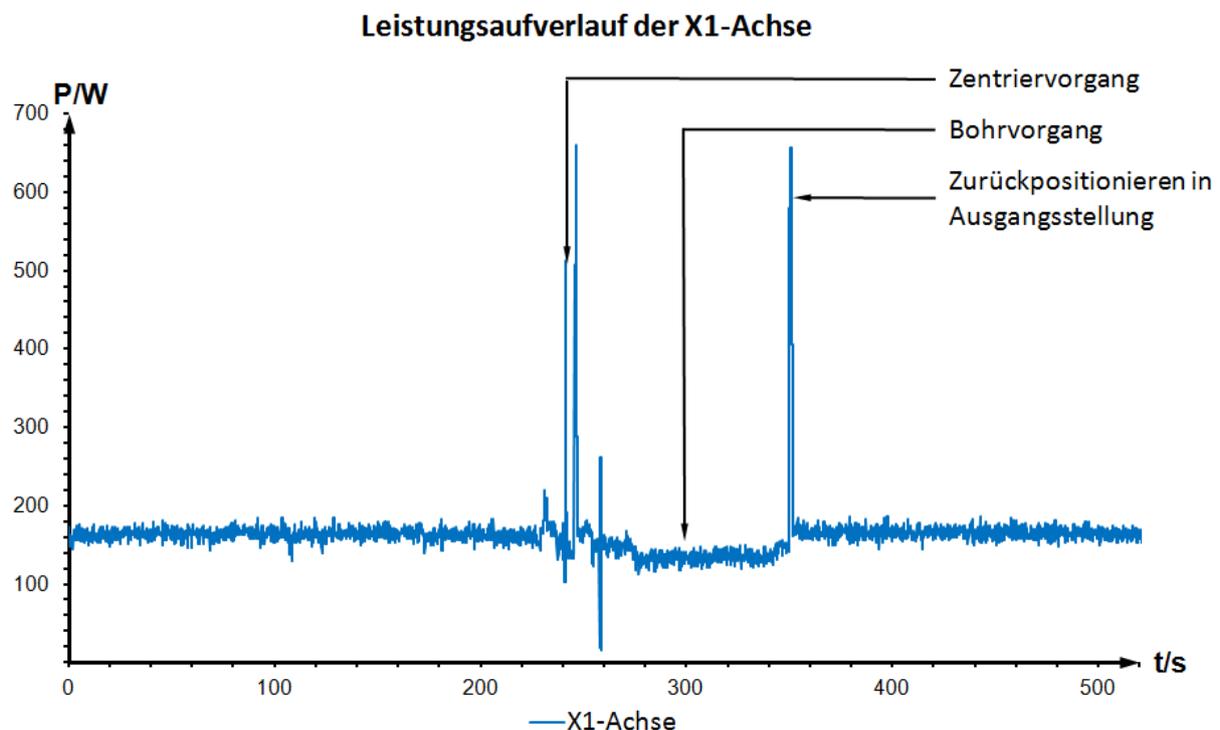


Abbildung 30: Leistungsverlauf der X1-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.4.10. Z1-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die Z1-Achse dient zur Bewegung des Fräsblocks in Richtung des Werkzeugmagazins. Im Prüfzyklus muss sie keine Zerspanungskräfte aufnehmen, sondern nur die Positionsgenauigkeit garantieren. Auch die Z1-Achse nimmt nur einen kleinen Teil der Gesamtleistung auf (siehe Anhang A19). Während der Bearbeitung treten mehrere Leistungsspitzen in der Leistungskurve auf, siehe Abbildung 31. Beim Zentrieren und Bohren fährt die Z1-Achse mehrmals zwischen Werkstück und Werkzeugmagazin hin und her. Sobald das CNC-Programm abgefahren ist, fährt der Block entlang der z-Achse zurück in die Ausgangsstellung. Die Leistungsspitzen können bis zu 2.500 Watt betragen. Im StandBy-Modus benötigt der Vorschubantrieb eine Leistung von 170 Watt.

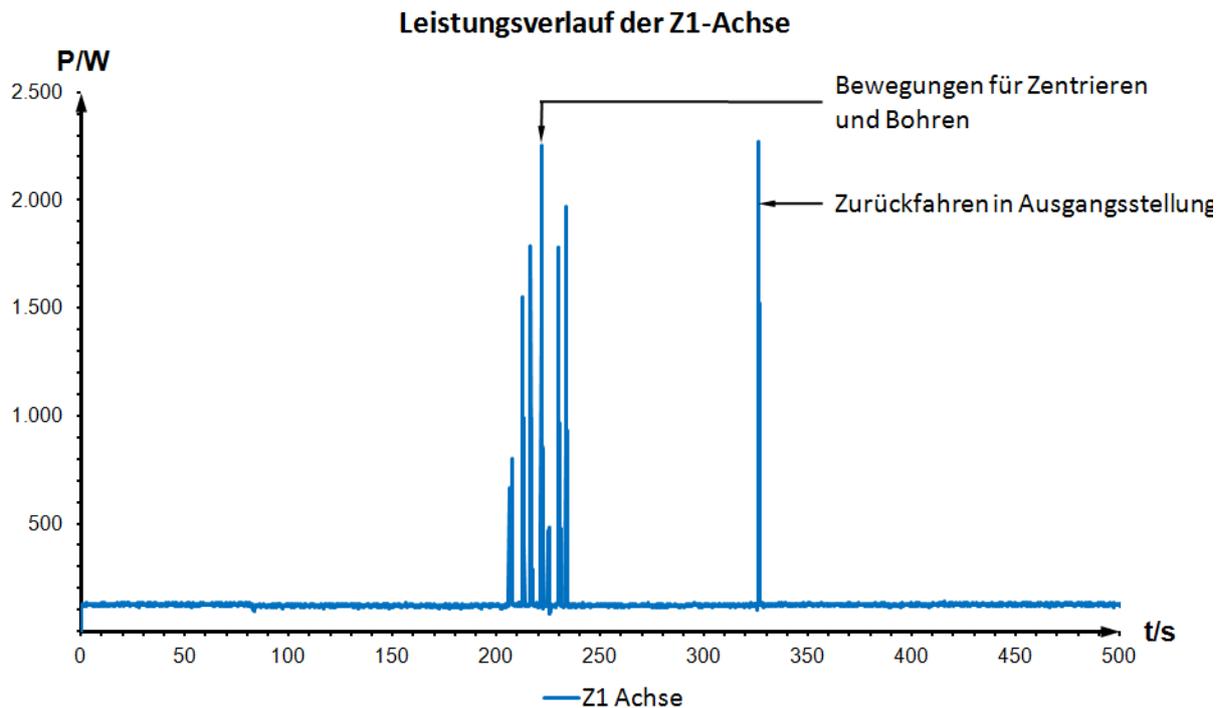


Abbildung 31: Leistungsverlauf der Z1-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.4.11. X2-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die X2-Achse dient zur Bewegung des unteren Werkzeughalters entlang dessen x-Achse. Im Prüfzyklus wird dieser Vorschub zum Plandrehen und zum Zustellen des Drehmeißels für die einzelnen Schnitttiefen beim Längsdrehen benötigt. In Anhang A20 sind die Leistungskurven der X2-Achse und der Gesamtmaschine dargestellt. Der Anteil der X2-Achse an der Gesamtleistung fällt ebenfalls wie die anderen Vorschubachsen kaum ins Gewicht. Damit ist auch hier das Energieeinsparpotenzial gering. In Abbildung 32 sind die Leistungsspitzen beim Positionieren des Schlittens zum Werkstück und zurück in die Ausgangsstellung zu sehen. Die Vorschubbewegung der Achse für die einzelnen Schnittstufen ist sehr gering und fällt in der Leistungskurve nicht auf. Durchschnittlich benötigt der Antrieb für die X2-Achse eine Leistung von 180 Watt, die Leistungsspitzen beim Positionieren betragen zirka 1.300 Watt.

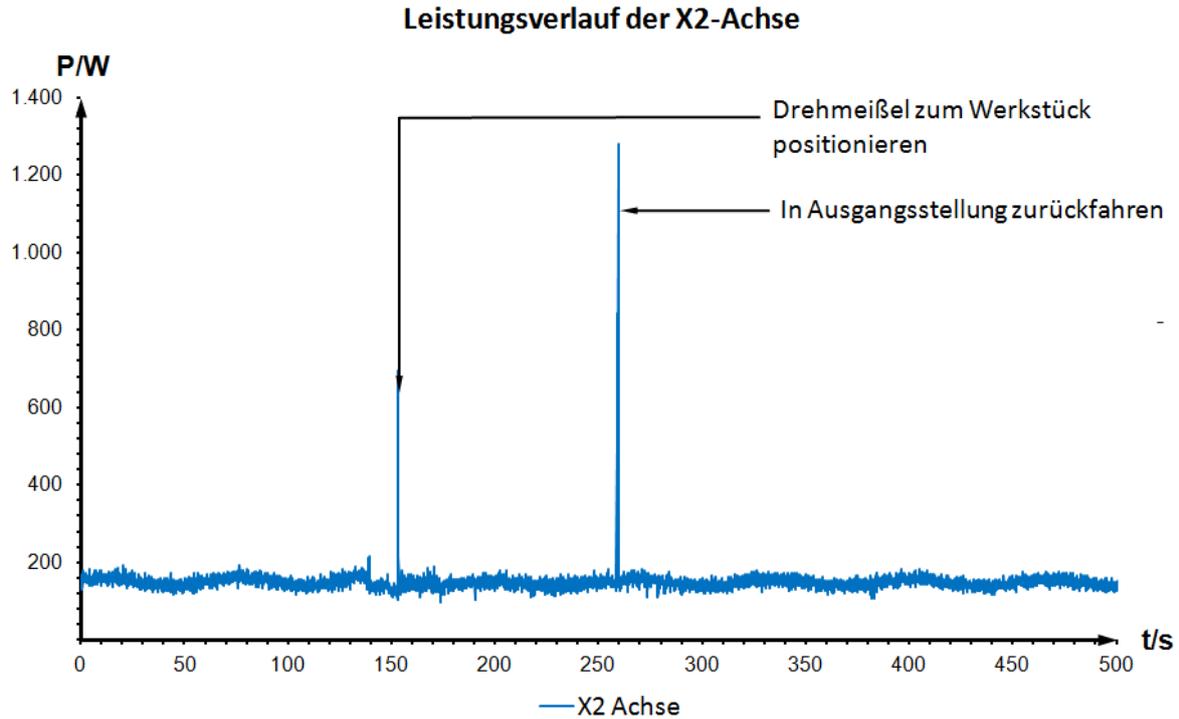


Abbildung 32: Leistungsverlauf der X2-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.4.12. Z2-Achse der EMCO Hyperturn-665MCPlus

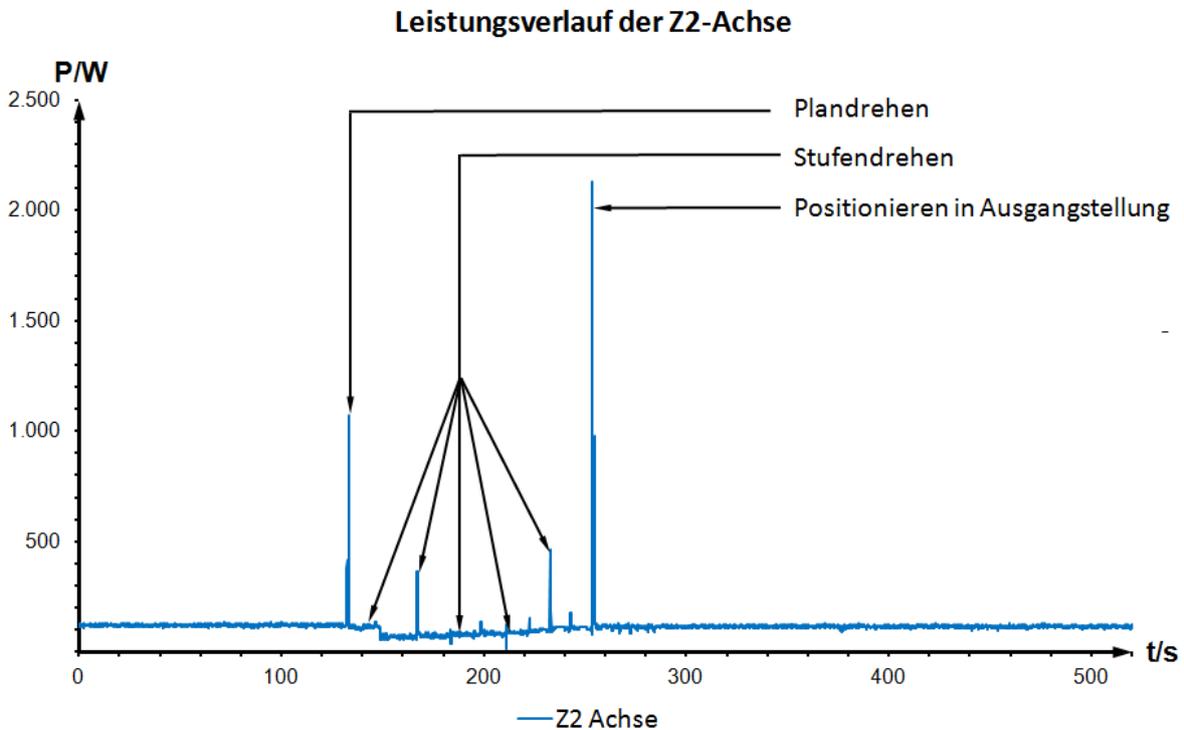


Abbildung 33: Leistungsverlauf der Z2-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die Z2-Achse ist jene Bewegungsrichtung, in der der untere Werkzeugschlitten in z-Richtung fährt. Wie bei der X2-Achse ist der Energieanteil zur Gesamtenergie auch hier sehr gering (Anhang A21). In Abbildung 33 ist der Leistungsverlauf der Vorschubachse dargestellt. Wie

bei den anderen Achsen treten Leistungsspitzen beim Positionieren des Werkzeuges zum Werkstück und beim Zurückfahren in die Ausgangsstellung auf. Beim Stufendrehen treten ebenfalls geringe Leistungsspitzen auf. Hier wird der Drehmeißel beim Eintreten ins Material abgebremst und muss wieder beschleunigen, damit die konstante Schnittgeschwindigkeit eingehalten wird. Während des Längsdrehens der Stufe ist die Leistungsaufnahme etwas geringer, als im StandBy-Modus. Die maximale Leistungsaufnahme beim Positionieren beträgt zirka 2.300 Watt und im Ruhemodus zirka 130 Watt.

5.4.13. Hauptspindel der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Die Hauptspindel ist in der EMCO Hyperturn-655MCPlus als Hohlwellenmotor ausgeführt. Der direkte Antrieb bringt den Vorteil, dass Bauraum, Getriebe und eine Riemenübersetzung eingespart werden können. Durchrutschen und Verschleiß des Riemens werden vermieden. Außerdem wird der Antrieb ohne Riemen schwingungssteifer. Dies liegt daran, dass es durch einen Riemenantrieb zu zusätzlichen Schwingungen während der Bearbeitung kommen kann. Schwingungen in der Bearbeitung führen zu Maßungenaugigkeiten und schlussendlich zum Ausschuss des Bauteils. Die Gesamtleistungsaufnahme der Hauptspindel ist vor allem beim Stufendrehen sehr groß.

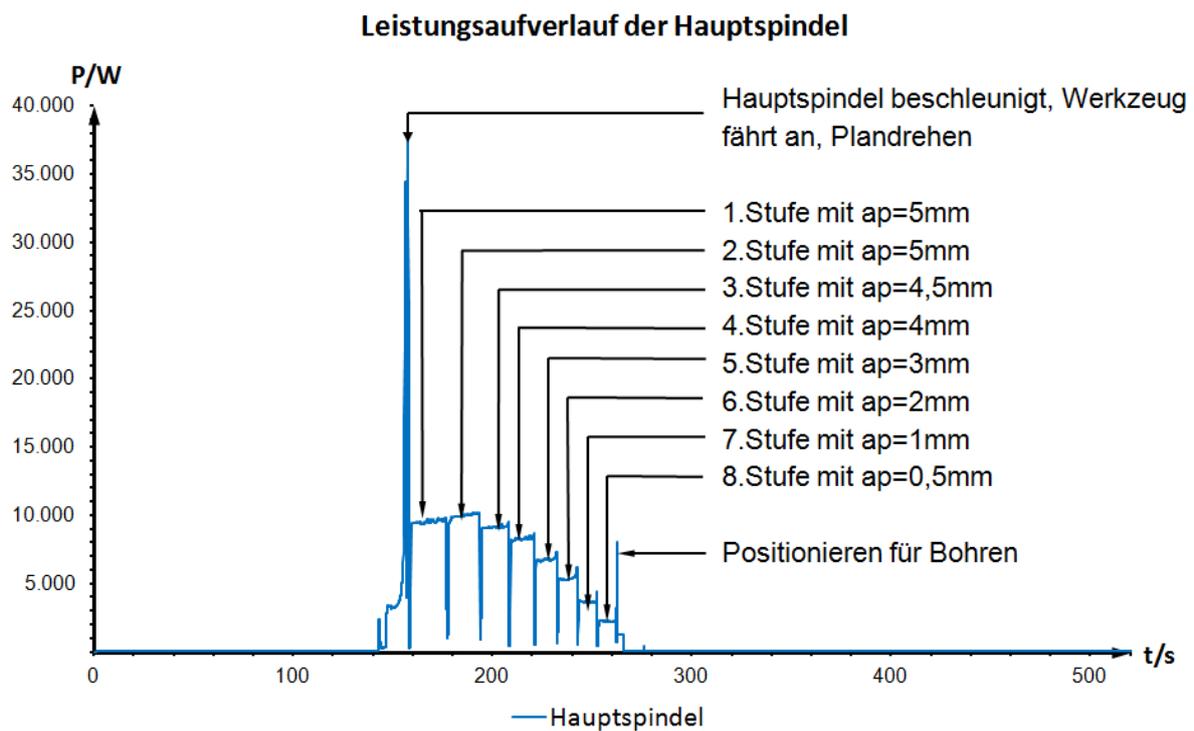


Abbildung 34: Leistungsverlauf der Hauptspindel bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

In Anhang A22 sind die Leistungskurven der Gesamtmaschine und der Hauptspindel beim Fertigen eines Referenzwerkstückes zu sehen. Die Hauptspindel muss die Zerspanungsenergie aufbringen und ihre Verlustleistungen überwinden. Verlustleistungen sind Reibungsverluste in Lagerstellen, elektromagnetische Verluste durch Hystereseschleife, und andere. Die große Energieaufnahme lässt schließen, dass diese Komponente ein großes Einsparpotenzial birgt. Beim Plandrehen entsteht eine Leistungsspitze von zirka 38.5 kW. Nähert sich der Drehmeißel dem Mittelpunkt des Werkstückes, so muss gleichzeitig die Spindel immer mehr beschleunigen, damit die Schnittgeschwindigkeit eingehalten wird.

Beim Längsdrehen der Stufen nimmt der Leistungsbedarf stufenartig ab (siehe Abbildung 34). Nach dem Stufendrehen wird die Querbohrung gebohrt. Hier positioniert die Spindel das Werkstück in Drehrichtung. Dem zu Folge kommt es zu einer kurzzeitigen und ruckartigen Drehbewegung mit einer Leistungsspitze. Im StandBy-Modus benötigt die Hohlspindel eine Leistung von zirka 100 Watt.

Für die Bestimmung der Zerspanungsenergie im Kapitel 5.4.14 wird eine Leistungsmessung der Hauptspindel im Luftschnitt benötigt. Bei dieser Messung bewegen sich die Werkzeuge in der Luft, deshalb auch Luftschnitt genannt. Die Hauptspindel muss dabei nur ihre eigenen Verluste überwinden. Der Verlauf der Leistungsmessung ist in Abbildung 35 dargestellt. Man erkennt, dass für das Längsdrehen der Stufen nur eine sehr geringe Leistung benötigt wird. Im Durchschnitt beträgt die Verlustleistung 200 Watt. In Anhang A23 ist die gesamte Leistungsmessung mit der Maschinenleistung beim Abfahren eines Luftschnitts abgebildet.

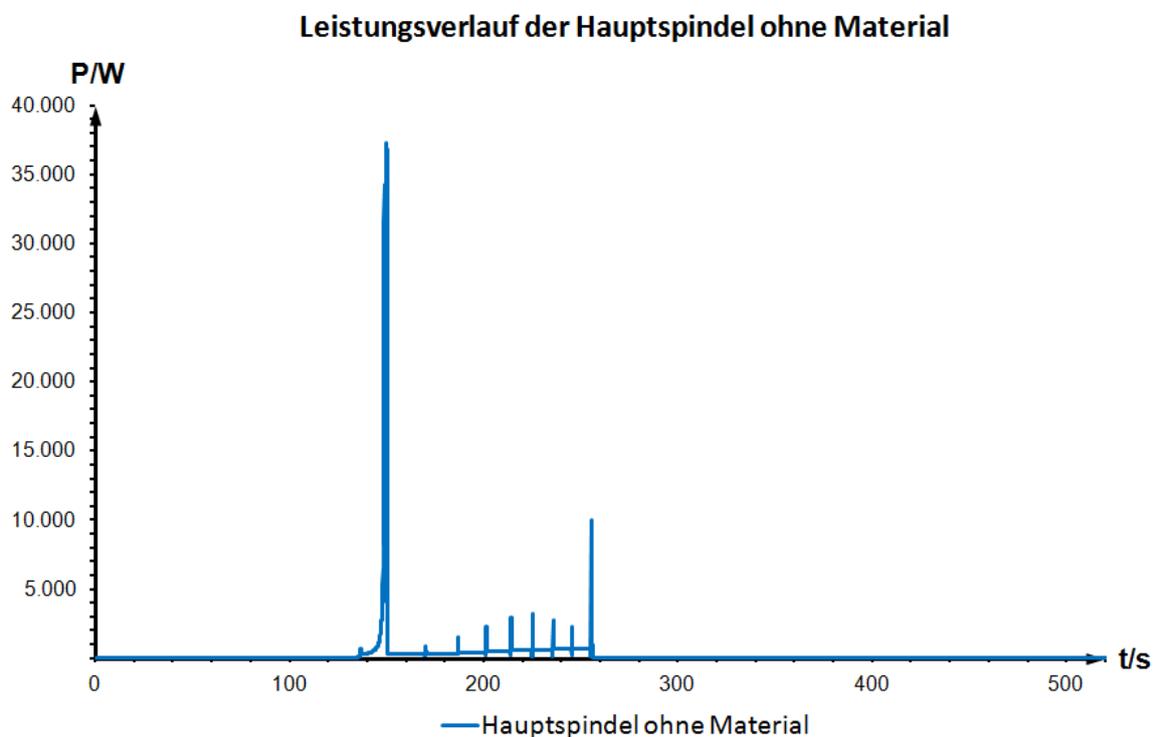


Abbildung 35: Leistungsverlauf der Hauptspindel ohne Material bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus

5.4.14. Bestimmung der Zerspanungsenergie

Die Zerspanungsenergie beim Fertigen des Testwerkstückes kann mittels Leistungsmessung bestimmt werden. Alternativ kann diese auch per Kraftmessung ermittelt werden. Damit die Zerspanungsenergie bestimmt werden kann, wird die Hauptspindel beim Fertigen eines Testwerkstückes leistungsvermessen. Natürlich treten in der Hauptspindel auch Verluste auf. Um diese berücksichtigen zu können, wird die Hauptspindel ebenfalls mit einem Luftschnitt vermessen. Hier fährt das Werkzeug in der Luft. Dieser Energieanteil wird von der Leistungsmessung mit Material abgezogen. Die Differenz stellt die aufgewendete Zerspanungsenergie dar.

In Tabelle 3 sind die Messwerte und Zerspanungsparameter der einzelnen Stufen aufgelistet. Der Energiebedarf einer Stufe wird in der Software von DEWESoft™ direkt abgelesen. In der Software wird mit Hilfe des Stromes und der Spannung die Wirkleistung der gesamten Werkzeugmaschine und der Komponenten ausgerechnet. Wird diese Leistung in ein bestimmtes Zeitfenster integriert, siehe Formel 7, so erhält man die exakte Energie jeder Stufe beim Längsdrehen. In Anhang A24 und A25 sind die zeitlichen Leistungs- und Energieverläufe der Gesamtmaschine und Hauptspindel abgebildet.

Tabelle 3: Zerspanungsenergie des Testwerkstückes mit der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Nr.	a	Q	V	E _{Maschine}	E _{Hauptspindel m.M.}	E _{Hauptsp. o.M.}	E _{Zerspanung}	E _{M.spez.}
	[mm]	[mm ³ /s]	[mm ³]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh/mm ³]
1	5	3750	60083	73	46	1	45	0,00090
2	5	3750	53014	64	42	2	40	0,00100
3	4,5	3375	41669	52	33	1	32	0,00106
4	4	3000	32233	42	26	2	24	0,00109
5	3	2250	21206	33	19	2	17	0,00127
6	2	1500	12723	27	14	2	12	0,00165
7	1	750	5938	22	9	2	7	0,00269
8	0,5	375	2863	17	6	2	4	0,00489

In der Spalte E_{Maschine} ist der Energiebedarf der Werkzeugmaschine in Abhängigkeit der verschiedenen Schnitttiefen aufgelistet. Die ersten beiden Stufen haben dieselbe Schnitttiefe, jedoch einen anderen Energiebedarf. Gründe für den Unterschied des Energiebedarfs sind die Walzhaut und die unterschiedlichen Durchmesser beim Drehen. Die Walzhaut führt zu einem unruhigen Eingriff der Werkzeugschneide und zu Schwingungen während der Bearbeitung. Unterschiedliche Durchmesser bei konstanter Schnittgeschwindigkeit führen zu unterschiedlichen Spindeldrehzahlen. Dies hat einen Einfluss auf die Trägheitsverluste der Hauptspindel. Für die weitere Betrachtung sind die Stufen zwei bis acht in den nachfolgenden Abbildungen 36 und 37 dargestellt. Es soll damit der Einfluss der Walzhaut ausgeschlossen werden.

Des Weiteren wird der Energiebedarf der Hauptspindel beim Fertigen des Testwerkstückes E_{Hauptspindel mit Material} und einmal im Luftschnitt E_{Hauptspindel ohne Material} aufgelistet. Beim Längsdrehen nimmt der Energiebedarf mit abnehmender Schnitttiefe ab. Im Luftschnitt benötigt die Spindel nahezu die gleiche Leistung und Energie. Die Differenz beider Werte ergibt die Zerspanungsenergie, welche in der Spalte E_{Zerspanung} eingetragen ist. Hier nimmt der Energiebedarf mit kleiner werdenden Stufen ab. In Abbildung 36 ist die Zerspanungsenergie in Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens dargestellt. Es ist zu sehen, dass die Zerspanungsenergie einen Großteil des Gesamtenergieverbrauchs ausmacht. Das Verhältnis zwischen Hauptspindelenergie beim Fertigen eines Testwerkstückes und der Gesamtenergieverbrauch der Werkzeugmaschine ist bei niedrigen Zerspanungsvolumen

ungünstig. Ab einem Zerspanungsvolumen größer 1500mm³/s wird das Verhältnis zwischen Zerspanungsenergie und Gesamtenergieverbrauch ausgeglichen. Erst oberhalb dieser Grenze ist die Maschine wirtschaftlich zu betreiben.

Zerspanungsenergie

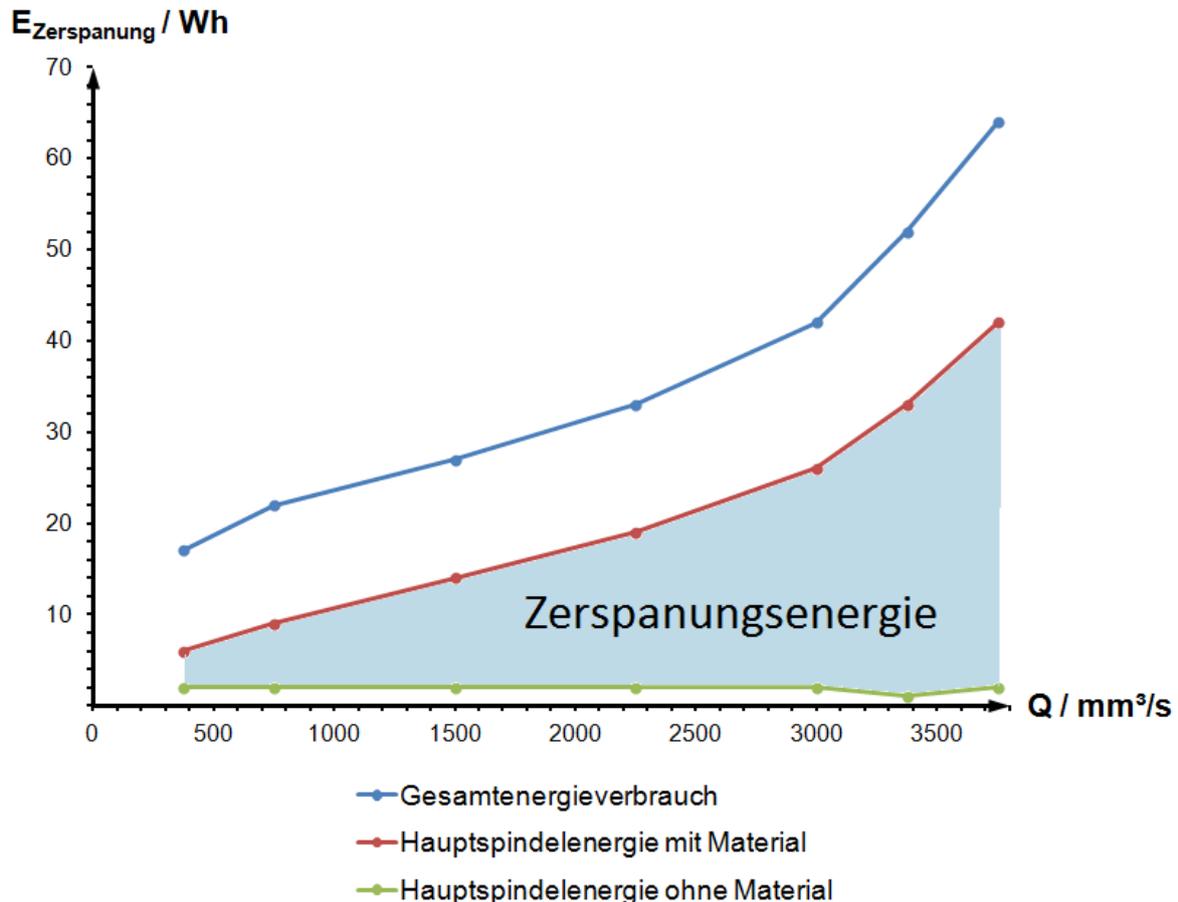


Abbildung 36: Zerspanungsenergie in Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens

Damit der spezifische Gesamtmaschinenenergiebedarf betrachtet werden kann, wird dieser auf das zerspannte Volumen bezogen (siehe Tabelle 3 Spalte $E_{M.spez.}$). Normalerweise wird vorausgesetzt, dass für jedes abgetragene mm³ Span gleich viel Energie verbraucht wird. In Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens kommt es zu einem unterschiedlichen Leistungsbedarf der verschiedenen Komponenten. Der Grund liegt darin, dass die Verluste in der Werkzeugmaschine, wie die elektrischen Verluste, kein lineares Verhalten aufweisen. Dies führt zu unterschiedlichen spezifischen Energiewerten. In Abbildung 37 ist zu sehen, dass vor allem bei niedrigen Zerspanungsvolumen der spezifische Energiebedarf überproportional hoch ist. Mit steigendem Zerspanungsvolumen sinkt auch der spezifische Energieverbrauch der Werkzeugmaschine.

Spezifische Maschinenenergie

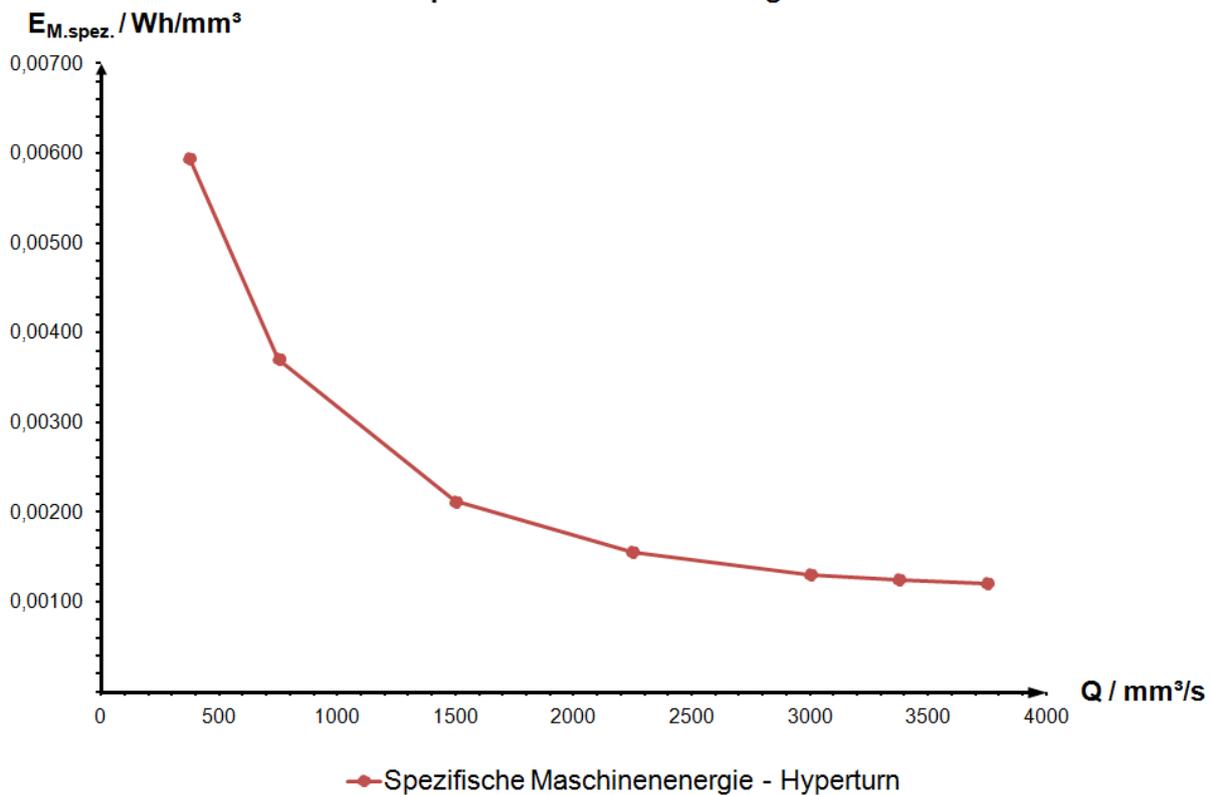


Abbildung 37: Spezifische Maschinenenergie in Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens

Die Zerspanungsparameter sollen damit so hoch wie möglich gewählt werden. Hohe Zerspanungsparameter erzeugen auch hohe mechanische Belastungen in der Werkzeugmaschine. Für ein effizientes und kostengünstiges Bearbeiten werden dynamische und steife Maschinen benötigt. Es ist aber zu beachten, dass bei jeder Messung Ungenauigkeiten auftreten können. Ablesefehler in der Software, Messungenauigkeiten der Stromwandler sind zum Beispiel als Fehlerquellen zu erwähnen. Diese Fehlerquellen haben natürlich einen Einfluss auf die Messergebnisse.

Nach B. Kührke könnten die spezifischen Zerspanungsenergieverläufe verwendet werden, um in Datenbanken von CAM-Systemen gesammelt zu werden. Diese Daten könnten direkt in **Computer Aided Manufacturing** Programme (CAM-Programme) integriert werden, indem der Energieverbrauch gleich beim Modellieren des Werkstückes angezeigt würde. Der Konstrukteur könnte bereits in der Konstruktionsphase die effizienteste und kostengünstigste Bearbeitung wählen.³²

Auch könnten die Zerspanungsenergieverläufe verschiedener Maschinen verglichen werden. Hätten sie zum Beispiel einen Schnittpunkt, so wäre ab diesem Zeitpunkt eine Maschine effizienter als eine andere. Dies hätte einen Einfluss auf welcher Werkzeugmaschine zum Beispiel die mechanische Bearbeitung stattfinden sollte. Der Käufer einer Werkzeugmaschine könnte mit einem von ihm gewünschten spezifischen Energieverlauf zu einem Maschinenhersteller gehen. Der Maschinenhersteller wäre mit dem gewünschten spezifischen Energieverlauf des Kunden verpflichtet, die effizientesten Komponenten für die Maschinenkonstruktion auszuwählen.

³² Vgl. Kührke B. (2011), S.49ff

5.4.15. Retrofit Faktor der Komponenten

Im Allgemeinen muss eine standardisierte Vorgehensweise und Auswertemethode von spanenden Werkzeugmaschinen definiert werden, damit eine Vergleichbarkeit stattfinden kann. Schon David Dornfeld³³, Professor an der Berkeley Universität, weist darauf hin, dass eine Vergleichbarkeit von Werkzeugmaschinen nur mit einem standardisierten Verfahren möglich ist. Um verschiedene Komponenten von Werkzeugmaschinen energetisch bewerten zu können, wird gemäß dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung der ETH Zürich eine Kennzahl, der Retrofit Faktor³⁴, definiert. Diese Kennzahl soll eine Möglichkeit für die Vergleichbarkeit von Komponenten und Baugruppen darstellen. Übersetzt heißt das aus dem englischen stammenden Wort „Retrofit“ Nachrüsten bzw. Modernisieren. Die betrachtete Komponente wird energetisch bewertet, ob sie gegen eine effizientere ausgetauscht werden soll oder nicht. Als Basis für die Bestimmung dieser Kennzahl dienen die Leistungsmessungen der verschiedenen Komponenten. Der Retrofit Faktor I_R ist eine dimensionslose Kennzahl und besteht aus zwei Gewichtungsfaktoren:

$$I_R = A_E \cdot A_0 \quad (15)$$

Der Faktor A_E berücksichtigt das Leistungsverhältnis zwischen der betrachteten Komponente i und der Gesamtleistung der Werkzeugmaschine.

$$A_{E,i} = \frac{E_i}{E_{System}} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} P_i(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} P_{System}(t) dt} \quad (16)$$

In Abbildung 38 ist die Aufteilung der Gesamtenergie in der Werkzeugmaschine dargestellt.

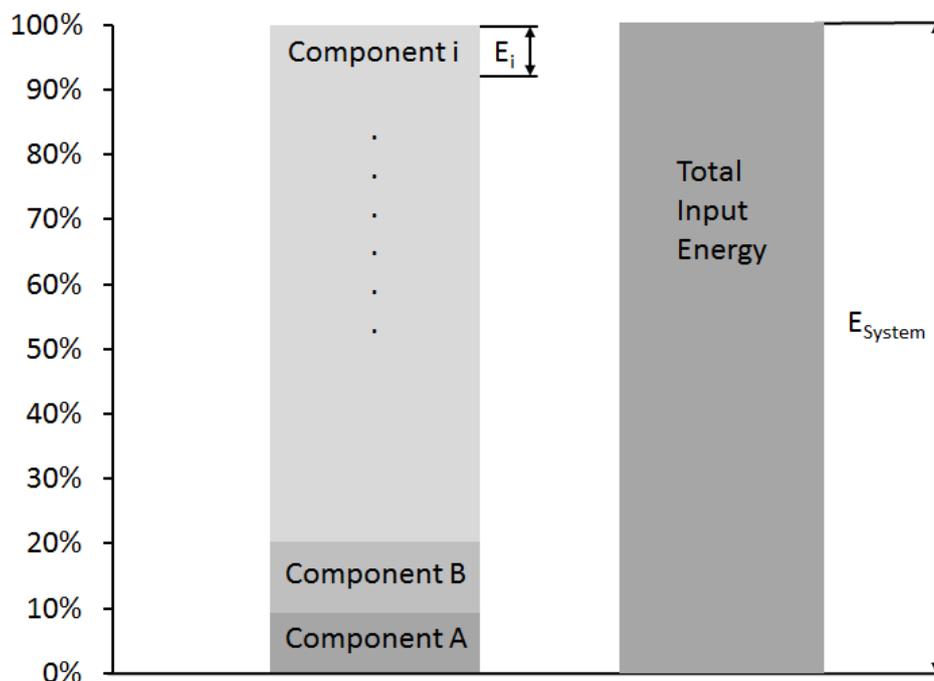


Abbildung 38: Darstellung der Energieaufteilung in einer Werkzeugmaschine

³³ <http://green-manufacturing.blogspot.co.at> (25.2.2014)

³⁴ <http://e-collection.library.ethz.ch> (25.2.2014)

Die zweite Kennzahl zur Bestimmung des Retrofit Faktors ist die Lastkollektivzahl $A_{0,i}$ der Komponente i . Bevor dieser Gewichtungsfaktor definiert werden kann, muss ein Zeitfenster für die Messauswertung und die Leistungsmessung zuerst normiert werden.

Definition der Zeitgrenzen

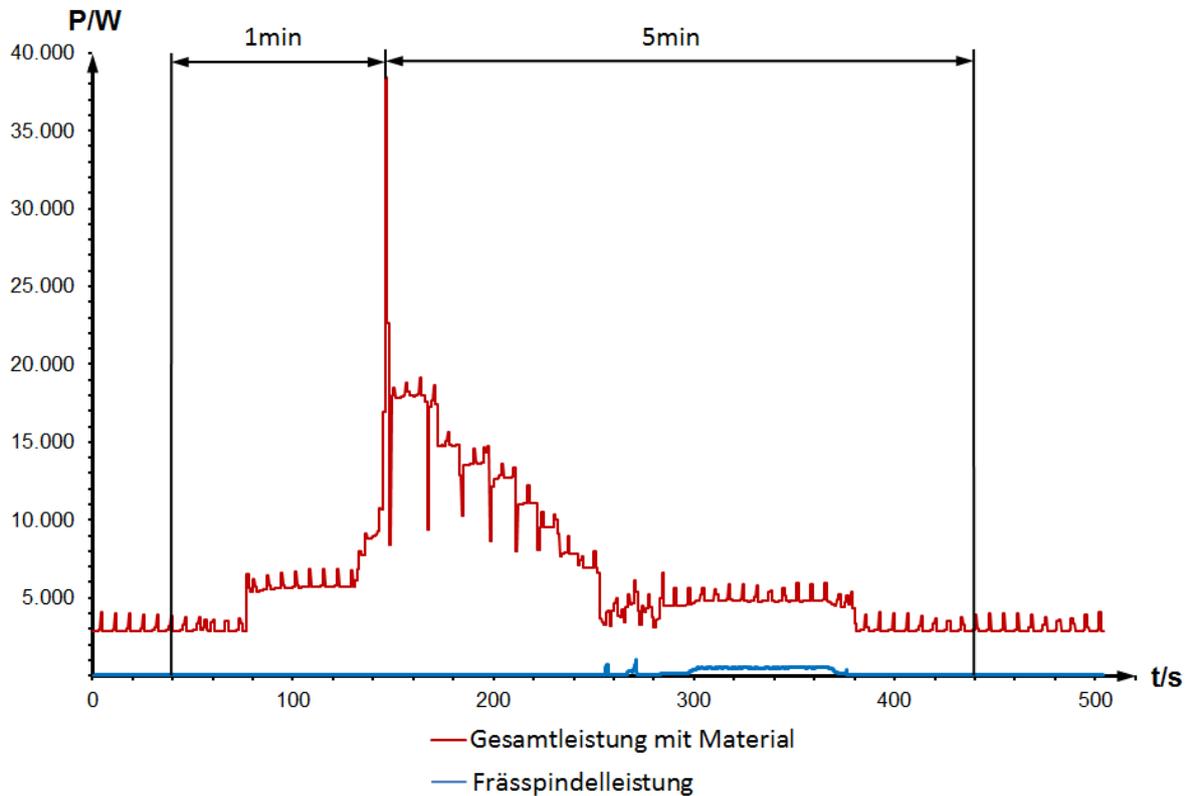


Abbildung 39: Definition der Zeitgrenzen für die Bestimmung des Retrofit Faktors

Für die Bestimmung der Energien ist eine zeitliche Einschränkung der Leistungsmessungen notwendig. Ein Zeitfenster muss daher definiert werden. Die Energie wird über die Leistung und Zeitdauer gebildet. Wird ein zu langes Zeitfenster gewählt, so werden jene Komponenten stärker in der Energiebilanz bewertet, die im StandBy-Modus aktiv sind. Die für die Bearbeitung aktiven Komponenten werden bei einem zu langen gewählten Zeitfenster unterbewertet. In Abbildung 39 sind die Zeitgrenzen für die Bestimmung der Integrale abgebildet. Ausgehend von der größten Leistungsspitze, vom Plandrehen, werden die Grenzen eine Minute davor und fünf Minuten danach definiert. Dieses Zeitfenster soll eine einheitliche Vergleichbarkeit der Komponenten schaffen. Für die Auswertung wird in der Praxis üblich die Effektivleistung herangezogen. Mit der Effektivleistung sind nur positive Werte möglich und diese erleichtert somit die Auswertung. Effektivleistung und Zeit müssen bereits normiert sein, damit im späteren Vorgehen eine Regressionsgerade durchgelegt werden kann. Die Leistung lässt sich im vorher bestimmten Zeitintervall mit folgender Formel normieren:

$$P_{i,norm} = \frac{P_i}{P_{i,max\ global}} \quad (17)$$

Ebenfalls muss die Zeit normiert werden, damit die Zeitachse dimensionslos ist.

$$t_{i,norm} = \frac{t_i}{t_{i,max}} \quad (18)$$

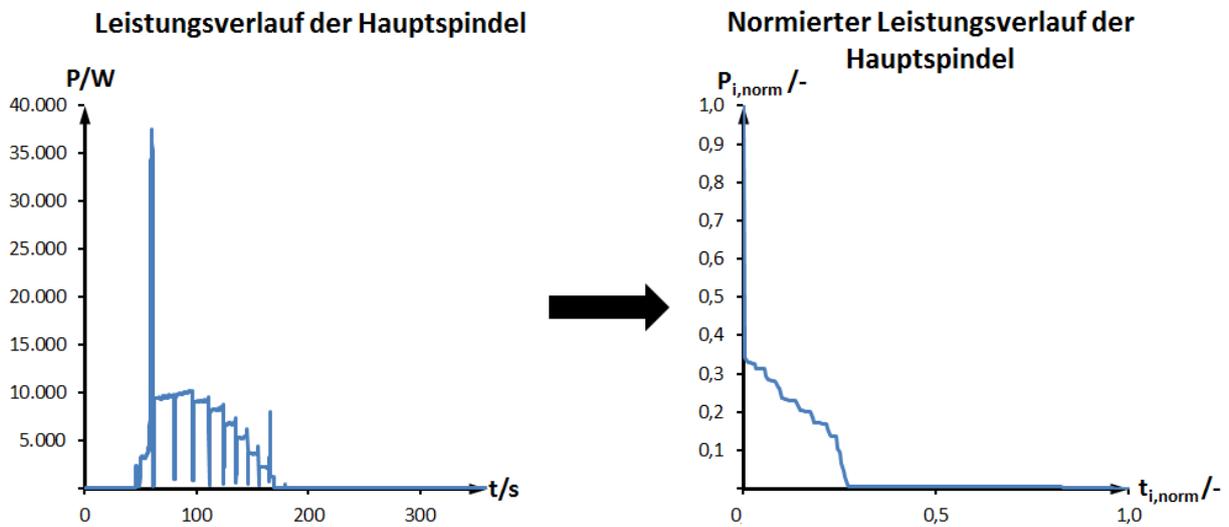


Abbildung 40: Normierung der Leistung und der Zeit

In Abbildung 40 ist die grafische Darstellung der Normierung der Hauptspindel dargestellt. Nach der Normierung der Wirkleistung kann eine Regressionsgerade hineingelegt werden (siehe Abbildung 41). Diese Gerade besitzt einen bestimmten Winkel, welcher für die Berechnung der zweiten Kennzahl $A_{0,i}$ notwendig ist. Dieser Gewichtungsfaktor $A_{0,i}$ trifft eine Aussage über das Lastkollektivverhalten einer Komponente i . In Formel 17 ist die Lastkollektivzahl $A_{0,i}$ definiert.

$$A_{0,i} = \frac{90^\circ - |\alpha_i|}{90^\circ} \quad (17)$$

Im Idealfall besitzt eine Komponente ein einziges Lastniveau über die gemessene Zeit, was bedeutet, dass der Leistungsbedarf konstant ist. Die dazugehörige Regressionsgerade wäre waagrecht und der dazugehörige Winkel der Regressionsgerade beträgt dann 0° und die Lastkollektivzahl wird zu Eins.

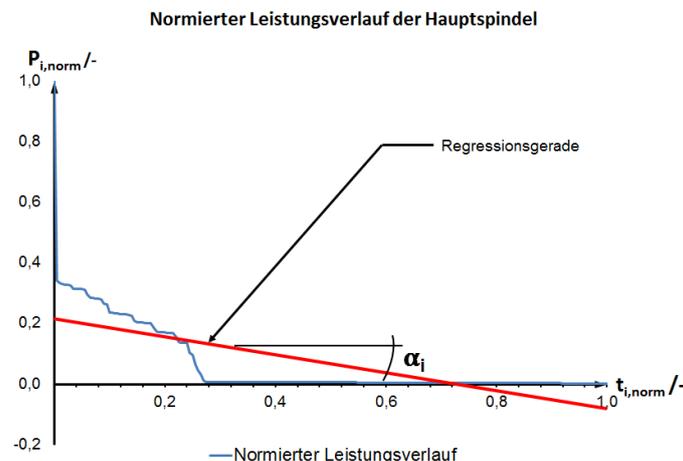


Abbildung 41: Bestimmung des Regressionswinkels α_i

In Anhang A25 bis A37 sind die Energieverläufe und Wirkleistungsverläufe der einzelnen vermessenen Komponenten der EMCO-Hyperturn dargestellt. In den Diagrammen sind auch die Wirkleistungsverläufe der Gesamtmaschine im Vergleich zu den Komponenten abgebildet. Damit kann eine zeitliche Zuordnung der einzelnen Messungen sichergestellt werden. In den Diagrammen ist der Energieverbrauch über die Messzeit zu sehen. Mit den Energieverläufen lässt sich der Leistungsgewichtungsfaktor $A_{E,i}$ berechnen. Die Normierung der Leistung und Zeit für den Faktor $A_{0,i}$ wird in Microsoft Excel[®] vorgenommen. Im Anhang A38 bis A50 sind die normierten Leistungsverläufe mit deren Regressionsgeraden zu erkennen. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 4: Retrofit Faktoren und Energiebedarf der einzelnen Komponenten

	$A_{E,i}$	$A_{0,i}$	I_R	$E_{\text{Komponente}}$
	[-]	[-]	[-]	[Wh]
Frässpindel	0,006	0,630	0,004	4
Hydraulikpumpe	0,104	0,378	0,039	73
B-Achse	0,003	0,786	0,002	2
Werkzeugmagazin	0,004	0,334	0,001	3
Kühlmittelpumpe-Werkzeugwender	0,066	0,720	0,047	46
Kühlmittelpumpe-Frässpindel	0,057	0,791	0,045	40
Hauptspindel	0,301	0,810	0,244	211
X2-Achse	0,020	0,608	0,012	14
Z2-Achse	0,014	0,808	0,012	10
Kühlaggregat	0,074	0,970	0,072	52
Werkzeugwechsler	0,007	0,937	0,007	5
X1-Achse	0,023	0,023	0,001	16
Z1-Achse	0,017	0,788	0,013	12
			Zwischensumme	488
andere Komponenten				214
			Summe	702

In Summe benötigt die Maschine für die Fertigung des Testwerkstückes 702 Wh. Die gemessenen Komponenten besitzen einen Energieanteil von 488 Wh. Die Differenz von 214 Wh kommt durch nicht vermessene Komponenten zustande. In Tabelle 4 ist dieser Wert mit „anderen Komponenten“ vermerkt. Im Schaltschrank befindet sich eine sehr hohe Anzahl von verschiedenen Schützen, Relais und Steuerungen für die verschiedenen Komponenten der Werkzeugmaschine. Alle Komponenten zu vermessen ist für ein standardisiertes Verfahren nicht zielführend, da eine große Zahl von Testwerkstücken und Zeit notwendig wären. Das Ziel ist es eine schnelle und einfache Methode zu finden, damit eine Vergleichbarkeit zwischen spanenden Werkzeugmaschinen stattfinden kann. Deshalb werden jene Verbraucher leistungsvermessen, die für das Fertigen des Referenzwerkstückes notwendig sind. Hier soll ein Verständnis geschaffen werden, wohin die Energie in der Maschine fließt und welche Komponente wieviel davon verbraucht. Die größten Verbraucher sind die Hauptspindel, das Kühlaggregat, die Hydraulikpumpe und die beiden Kühlpumpen. Gemäß der Veröffentlichung des IWF wird vorgeschlagen, dass erst ab einen Retrofit Wert von 5% Überlegungen gemacht werden sollen, die Komponenten gegen effizientere auszutauschen.

Energiebedarf der verschiedenen Komponenten

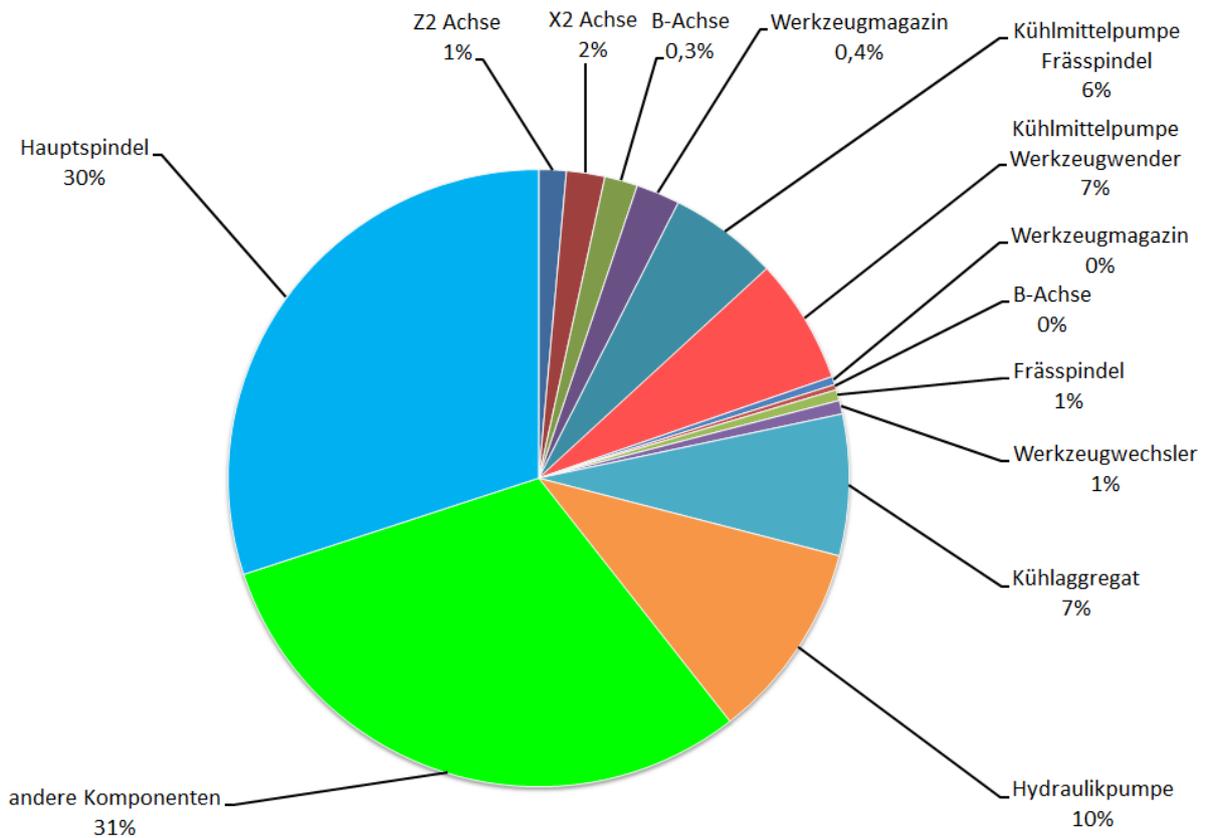


Abbildung 42: Energieaufteilung in der EMCO Hyperturn-665MCPlus

Im Tortendiagramm, Abbildung 42, ist eine grafische Aufteilung der Energie zu sehen. In den größten Verbrauchern steckt auch das größte Energieeinsparpotenzial. Es ist aber zu beachten, dass diese Ergebnisse durch das Fertigen des gewählten Testwerkstückes zustande gekommen sind. Bei einem anderen Referenzwerkstück liefert das Leistungsmessen andere Ergebnisse.

Im Allgemeinen muss der Energieverlauf einer Leistungsmessung nicht immer stetig ansteigen, sondern sie kann auch zeitweise fallen. Dies wirkt sich auf den Gewichtungsfaktor A_E aus. Ist ein Rekuperationsmodul im Schaltschrank der Werkzeugmaschine eingebaut, so kann die zurückgewonnene Energie beim Bremsen eines Motors wieder ins Netz eingespeist werden. Andernfalls wird sie mit Widerständen in Wärme umgesetzt und geht damit verloren. Auch die Dauer des gewählten Zeitfensters für die Energiebetrachtung hat einen starken Einfluss aus. Wird ein kurzes Zeitfenster gewählt, so nimmt der Einfluss der Komponenten im StandBy-Modus, wie Hydraulik und Kühlpumpen ab. Die Hauptspindel hingegen würde bei einem kürzeren Zeitfenster an Bedeutung gewinnen. Ihr Energieanteil bleibt konstant, aber die Gesamtenergie nimmt ab. Damit steigt ihr Leistungsanteil an.

Bei konventionellen Maschinen ist der Anteil der „anderen Komponenten“ geringer. So lässt sich vorhersagen, dass solche Maschinen nach diesem Prüfverfahren besser abschneiden werden. Für den Käufer einer Werkzeugmaschine stellt sich jedoch die Frage, welche Konfiguration der Maschine überhaupt notwendig ist. Eine hohe Bearbeitungsflexibilität bringt auch viele verschiedene Komponenten und deren Anzahl mit sich. Damit steigt auch der

Energiebedarf rasch an. Hier muss der Käufer selbst entscheiden, welche Werkzeugmaschine und Konfiguration für ihn am besten ist.

Ein Unternehmer muss im Vorfeld wissen, was mit der Werkzeugmaschine bearbeitet werden soll. In Massenfertigung bzw. in der Serienfertigung werden Maschinen meistens für dieselben Tätigkeiten genutzt. Zum Beispiel für das Konturdrehen einer Welle in der Getriebeproduktion. Wenn im Voraus bekannt ist, welche Bauteile hergestellt werden sollen, so kann ein passendes Testwerkstück definiert werden. So kann er das herzustellende Bauteil als Referenzwerkstück wählen. Er könnte mehrere Messungen an verschiedenen Maschinen am Markt durchführen lassen. Damit bekommt er realitätsnahe Ergebnisse aus der Vergleichbarkeitsanalyse für seine Maschinenauswahl. Denn diese entsprechen der Realität mehr als ein vordefiniertes Referenzwerkstück. Doch die allgemeine Vergleichbarkeit mit anderen spannenden Werkzeugmaschinen geht verloren.

Kleinere Unternehmer benötigen zumeist Werkzeugmaschinen für ein breites Arbeitsspektrum. Hier müssen verschiedenste Werkstücke gefertigt werden. Deshalb kommt es auf eine möglichst hohe Bearbeitungsflexibilität der Maschine an. Der Unternehmer kann hier kein Testwerkstück, das seine Anforderungen entspricht, vorschlagen, da er im Vorfeld nicht weiß, welche Bauteile er herstellen muss. Deshalb ist ein vordefiniertes Testwerkstück als Lösungsansatz zu wählen. So kann er mit einer Leistungsanalyse ungefähr vorhersagen, welche Maschine für ihn am effizientesten und am besten arbeitet.

5.5. Leistungsvergleich mit einer zweiten Maschine

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der EMCO Hyperturn-665MCPlus mit einer zweiten Maschine verglichen. Es soll eine Vergleichbarkeit zwischen zwei verschiedenen Maschinen hergestellt werden. Als zweite Maschine wird die am Institut befindliche Voest Weipert WNC-500S, ein CNC-Drehbearbeitungszentrum, gewählt. Im Vergleich muss jedoch eine Einschränkung getroffen werden. Die Voest-Weipert besitzt nur ein angetriebenes Winkelgetriebe für ein Werkzeug der Hilfsachse. Es sind zwei angetriebene Winkelantriebe notwendig, damit Zentrieren und Bohren für den Prüfzyklus möglich sind. Aus diesem Grund wird nur das Stufendrehen als Vergleich herangezogen. Es soll die Gesamtenergie, Hauptspindelenergie und die StandBy-Leistung beider Maschinen verglichen werden. Zusätzlich wird die Zerspanungsenergie und der Retrofit Faktor der Hauptspindel berechnet.

5.5.1. Leistungs- und Energievergleich beider Werkzeugmaschinen

Für einen Vergleich beider Werkzeugmaschinen müssen gleiche Voraussetzungen geschaffen werden. Ein verkürzter Prüfzyklus wird angewendet, d.h. die Querbohrung entfällt. Bei beiden Werkzeugmaschinen werden die Gesamt- und die Hauptspindleistung vermessen. In Abbildung 43 ist ein Vergleich beider Gesamtleistungskurven abgebildet. In der StandBy-Phase ist bereits ein Unterschied beider Maschinen zu erkennen. Die EMCO-Hyperturn benötigt mehr Energie als die Voest-Weipert in der Ruhephase. Die Ursache liegt darin, dass die EMCO-Hyperturn mehr automatisierte Hilfsachsen als die Voest-Weipert besitzt. Dies wirkt sich natürlich auf die Leistungsaufnahme beim Stufendrehen aus. Hier ist

ein Unterschied zwischen beiden Maschinen zu sehen. Die kurzzeitigen Leistungsspitzen der Voest-Weipert beim Stufendrehen kommen durch den Eingriff des Werkzeuges in den Werkstoff zustande. Der Motor muss kurzzeitig beschleunigen, damit die Zerspanungsparameter eingehalten werden können.

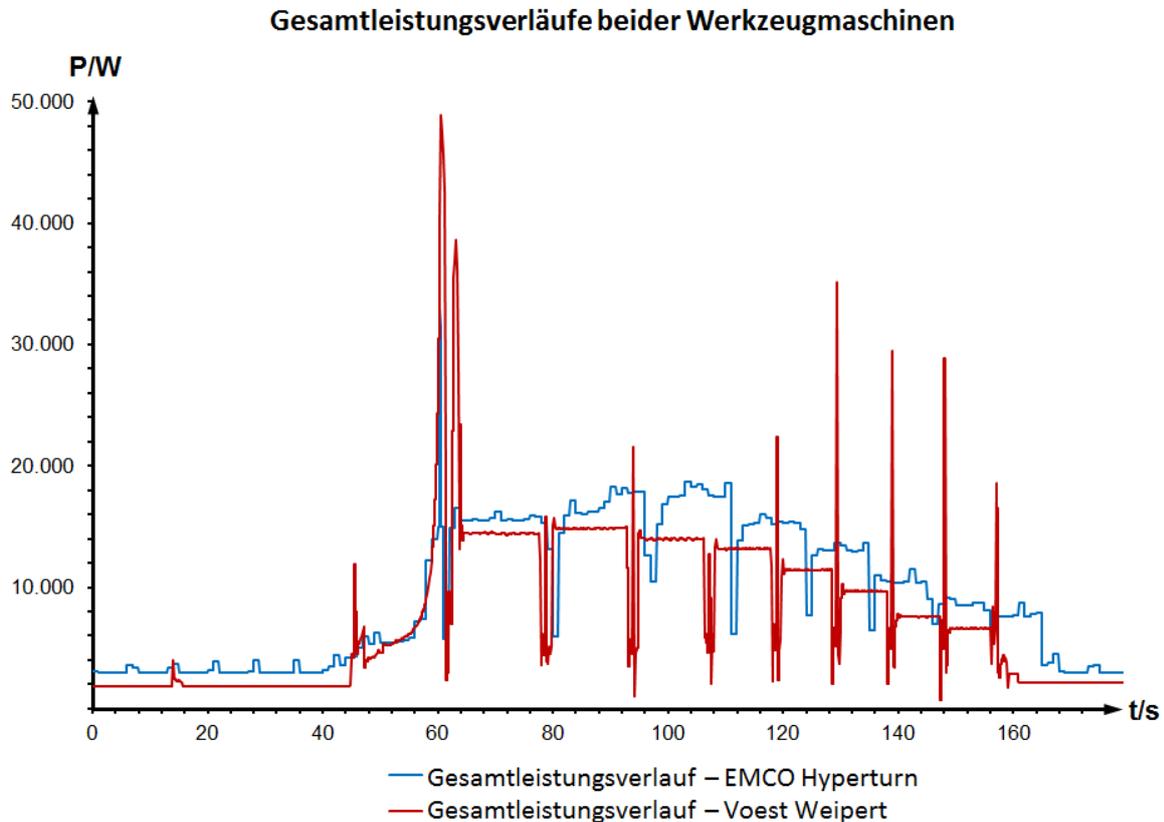


Abbildung 43: Gesamtleistungsverläufe beider Werkzeugmaschinen

Der Unterschied durch die Anzahl der verbauten Komponenten wirkt sich vor allem auf den Energieverbrauch aus, siehe Anhang A52 und A53. Die Differenz der Gesamtenergien beträgt zirka 98 Wh. Aus Sicht des Energieverbrauchs ist die Voest-Weipert besser für das Stufendrehen geeignet, als die EMCO-Hyperturn. Diese Aussage ist jedoch nur auf das Stufendrehen beschränkt. Ist eine flexiblere Bearbeitung mit mehreren verschiedenen Werkzeugen notwendig, so ist die EMCO-Hyperturn die bessere Wahl. Der Unterschied beim Energieverbrauch der Hauptspindel beträgt 28,5 Wh. Bei der EMCO-Maschine ist ein Hohlwellenmotor für den Hauptantrieb verbaut. Bei der Voest-Maschine ist ein Elektromotor mit einem Planetengetriebe und einer Riemenübersetzung zur Hauptspindel eingebaut. Die aufzubringende Leistung zum Überwinden der inneren Verluste ist größer als bei einem direkten Antrieb der Hauptspindel. Ein Direktantrieb der Hauptspindel mit einem Holwellenmotor ist platzsparender, dynamischer und effizienter.

5.5.2. Retrofit Faktoren beider Hauptspindel

Verschiedene verbaute Komponenten können mithilfe des Retrofit Faktors I_R verglichen werden. Es kann eine Aussage getroffen werden, ob die Komponente effizient für das zu fertigende Bauteil ist. Hier sollen beide Hauptspindeln ausgewertet werden. Bevor der

Retrofit Faktor I_R ausgerechnet werden kann, muss ein Zeitfenster wie in Kapitel 5.4.15 definiert werden. Es bietet sich hier an, vom Plandrehen aus, der größten Leistungsspitze, einen Zeitraum zu definieren. Als Zeitfenster werden drei Minuten gewählt, eine Minute vor der Spitze und zwei Minuten nach der größten Leistungsspitze. Damit lässt sich die verbrauchte Energie für die Bestimmung des Leistungsverhältnisses zwischen Hauptspindel und Gesamtmaschine bestimmen, siehe Formel 16. Im Anhang A54 und A55 sind beide normierten Leistungskurven der Hauptspindeln dargestellt. Aus ihnen kann der Winkel α_i der Regressionsgerade für die Bestimmung des Lastkollektivfaktors A_0 bestimmt werden.

In Tabelle 5 sind die Werte für die Berechnung des Retrofit Faktors I_R aufgelistet. Im definierten Zeitraum ist die Gesamtenergieaufnahme der Voest-Weipert geringer als die der EMCO-Hyperturn. Die Anzahl der verbauten Komponenten bei der EMCO-Hyperturn Maschine ist höher als bei der Voest-Weipert Maschine. Somit kommt der höhere Energieverbrauch der EMCO-Hyperturn zustande. Die Energieaufnahme der Hauptspindeln ist ebenfalls unterschiedlich. Die Energie wird über das Aufsummieren der Leistung über die gewählte Zeit bestimmt. Obwohl dieselben Zerspanungsparameter in den Maschinen eingestellt sind, kommt es beim Stufendreihen zu kleinen Abweichungen in den Zeiträumen. Ablesefehler in der Software, Ungenauigkeiten in der Messausrüstung können hier Fehlerquellen sein.

Tabelle 5: Retrofit Faktoren beider Hauptspindeln

	EMCO Hyperturn-665MCPlus	Voest Weipert WNC-500S
E_{Maschine}	462 Wh	365 Wh
$E_{\text{Hauptspindel}}$	244 Wh	215 Wh
A_0	0,78	0,55
A_E	0,53	0,59
I_R	0,41	0,32

Im Gewichtungsfaktor A_0 kommt es zu einem wesentlichen Unterschied. Da bei der Voest-Weipert zwischen den einzelnen Stufen größere Leistungsspitzen zustande kommen, kommt es auch zu einer anderen Lastkollektivaufteilung. Die größeren Lastniveaus werden durch die Leistungsspitzen öfters erreicht, was zu einem Unterschied in dieser Auswertungsmethode führt. Arbeitet eine Komponente nur auf einem Energieniveau, so ist der Regressionswinkel α_i Null und der Lastkollektivfaktor A_0 wird zu Eins. Insgesamt ist dann der Retrofit Faktor I_R hoch und sagt damit aus, dass in der Komponente ein hohes Energieeinsparpotenzial steckt. Somit sollte sie gegen eine modernere und effizientere ausgetauscht werden.

Es muss beachtet werden, dass eine Komponente im Teillast- oder im Volllastbereich auf einem konstanten Energieniveau arbeiten kann. In der Berechnung des Retrofit Faktors wird dieser Hintergrund nicht berücksichtigt, obwohl dieser berücksichtigt werden müsste. Damit kommt es zu dem Paradoxon, dass es im Lastkollektivfaktor A_0 zu einem schlechteren Abschneiden der Voest-Weipert Hauptspindel kommt, obwohl sie öfter ein höheres Energieniveau erreicht, als die EMCO-Hyperturn Maschine. Ursächlich ist ihr größerer Regressionswinkel, als bei der EMCO-Hyperturn Werkzeugmaschine. Die Lastkollektivzahl A_0 der Voest-Weipert fällt somit schlechter aus.

Es ergibt sich, dass ein größeres Einsparpotenzial in der Hauptspindel der EMCO-Hyperturn vorhanden ist. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass dieses Ergebnis nur für das

Referenzwerkstück gilt. Da die Voest-Weipert über keinen direkten Hauptspindelantrieb verfügt, liegt das größere Energieeinsparpotenzial bei ihr. Damit könnte der Hauptspindelantrieb in der Voest-Weipert Werkzeugmaschine gegen einen effizienteren und moderneren Hohlwellenmotor ausgetauscht werden.

5.5.3. Spezifische Zerspanungsenergie der Voest Weipert WNC-500S

Die Zerspanungsenergie wird wie in Kapitel 5.4.14 beschrieben bestimmt. Die Hauptspindel der Voest-Weipert wird leistungsvermessen. Für die Bestimmung der Zerspanungsenergie sind zwei Prüfzyklen notwendig. Einmal wird die Leistung beim Fertigen eines Referenzwerkstückes und einmal beim Abfahren in der Luft gemessen. Die Differenz beider Leistungsmessungen der Hauptspindel ergibt die Zerspanungsenergie. Die Fläche zwischen der Hauptspindel mit Material und Hauptspindel ohne Material (Luftschnitt) stellt die Zerspanungsenergie über das Zerspanungsvolumen dar (siehe Abbildung 44).

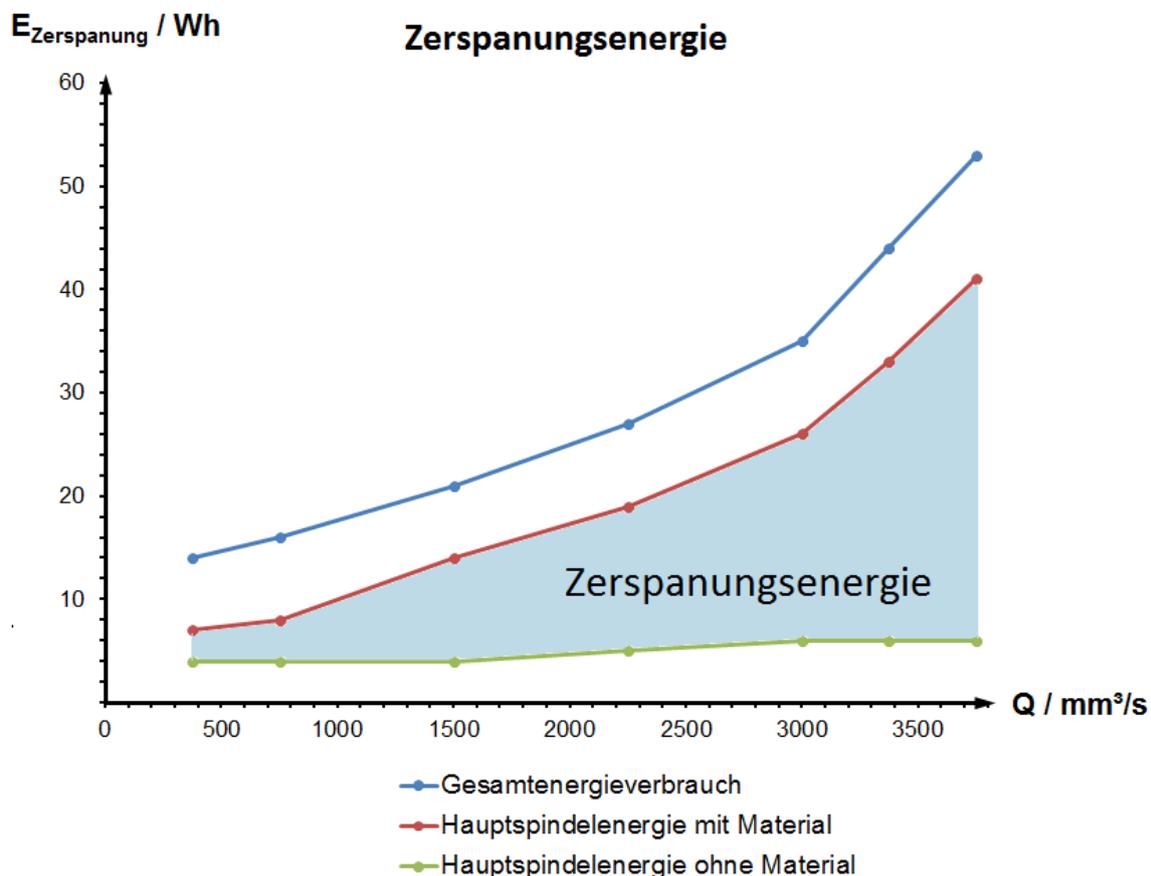


Abbildung 44: Zerspanungsenergie der Voest Weipert WNC-500S

Die benötigte Energie im Luftschnitt ist größer als bei der EMCO-Hyperturn. Der Grund liegt darin, dass hier kein direkt angetriebener Hohlwellenmotor eingebaut ist. In der Voest Weipert sind ein Motor, ein Getriebe und eine Riemenübersetzung zur Hauptspindel eingebaut. Damit steigt die Verlustkette vom Motor bis zur Hauptspindel stark an. Die Leistungskurve des Gesamtenergieverbrauches verläuft annähernd parallel zur Hauptspindelleistung mit Material. Die Werkzeugmaschine benötigt eine konstante

Leistungsaufnahme für den StandBy- und Operational-Betrieb. Die Abweichung der Parallelität ergibt sich durch das Versetzen der Maschine in den Operational-Mode. Hier werden zusätzliche Komponenten, wie Vorschubantriebe und Schmierpumpen, beim Starten des CNC-Programmes mit Energie versorgt, welche sonst im StandBy-Modus ausgeschaltet sind.

In nachfolgender Tabelle 6 ist die Zerspanungsenergie der einzelnen Stufen aufgelistet. Im Vergleich zu Tabelle 3, wo die Zerspanungsenergie der EMCO-Hyperturn aufgelistet ist, kommt es zu kleineren Abweichungen. Besonders bei großen Schnitttiefen kommt es zu größeren Abweichungen. Beim Prüfzyklus für das Längsdrehen ist der gleiche Drehmeißel verwendet worden. Die Schneidgeometrie des Werkzeuges hat einen Einfluss auf die Leistungsmessung, da die Geometrie die Kraftaufteilung und somit die Leistung der Hauptspindel beeinflusst. Je kleiner die Schnitttiefe ist, desto besser passen die Ergebnisse überein. Allgemeine Messungenauigkeiten beim Messgerät und Ablesefehler am Computer sind als Fehlerquellen zu erwähnen. Sollen die gesammelten Daten für CAM-Systeme gesammelt werden, so ist eine statische Auswertungsmethode unbedingt notwendig, damit Messergebnisse in ihrer Aussage bestätigt werden. Eine Vergleichbarkeit spanender Werkzeugmaschinen hat das Ziel, einfache und schnelle Ergebnisse zu gewinnen.

Tabelle 6: Spezifische-Maschinenenergie der Voest Weipert WNC-500S

Nr.	a	Q	V	E_{Maschine}	$E_{\text{Hauptspindel m.M.}}$	$E_{\text{Hauptspindel o.M.}}$	$E_{\text{Zerspanung}}$	$E_{\text{M.spez.}}$
	[mm]	[mm ³ /s]	[mm ³]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh]	[Wh/mm ³]
1	5	3750	60083	54	43	6	37	0,00090
2	5	3750	53014	53	41	6	35	0,00100
3	4,5	3375	41669	44	33	6	27	0,00106
4	4	3000	32233	35	26	6	20	0,00109
5	3	2250	21206	27	19	5	14	0,00127
6	2	1500	12723	21	13	4	9	0,00165
7	1	750	5938	16	8	4	4	0,00269
8	0,5	375	2863	14	7	4	3	0,00489

Im nachfolgenden Diagramm werden beide spezifischen Gesamtmaschinenenergien verglichen (siehe Abbildung 45). Die spezifische Maschinenenergiekurve der Voest-Weipert schneidet im gesamten Zerspanungsvolumenbereich besser als die EMCO-Hyperturn Maschine ab. Damit ist die Anzahl der verbauten Hilfsantriebe und Spindeln in einer Maschine entscheidend. Die einfachere gebaute Voest-Weipert Werkzeugmaschine wird effizienter bewertet, kann aber im Vergleich zur EMCO-Hyperturn Maschine eine nicht so hohe Bearbeitungsflexibilität aufweisen. Werden mehrere Werkzeugmaschinen vermessen, so können die Maschinenenergiekurven auch Schnittpunkte bilden. Schnittpunkte in Leistungsverläufen können folgendermaßen interpretiert werden, dass eine Werkzeugmaschine abhängig von ihrem Zerspanungsvolumen besser geeignet ist als eine andere.

Spezifische Maschinenenergie

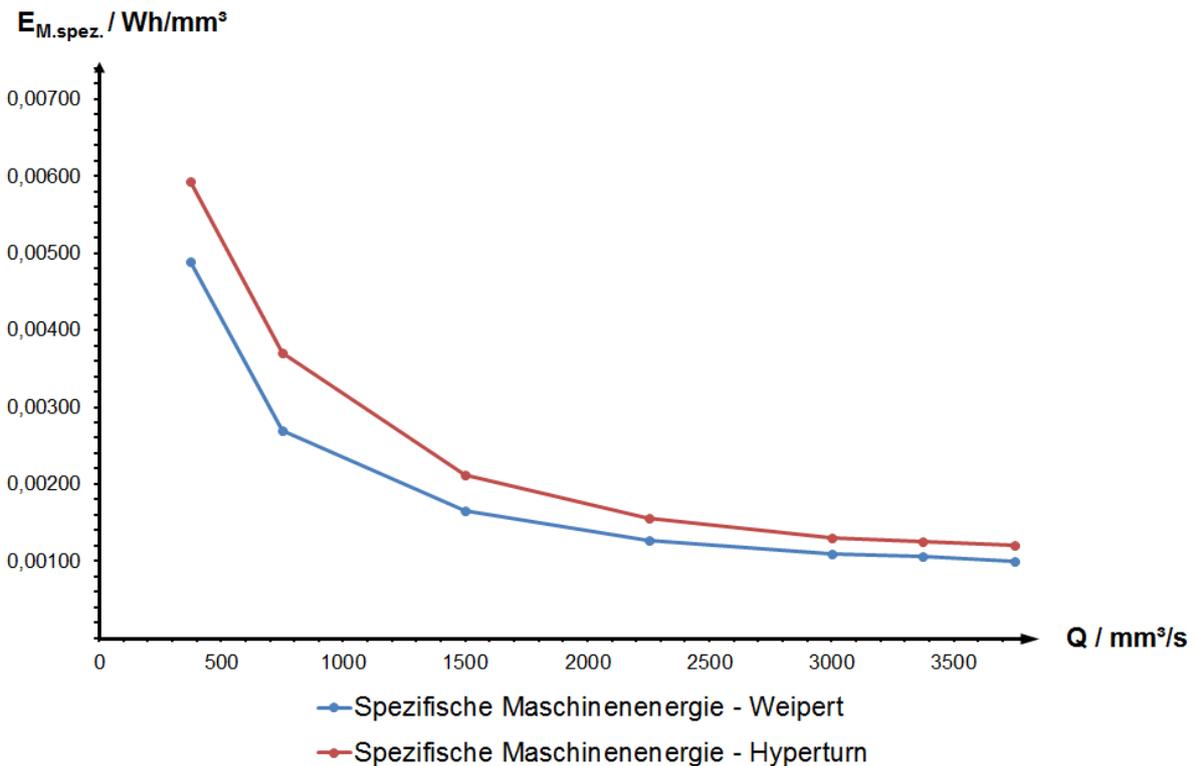


Abbildung 45: Vergleich beider spezifischen Gesamtmaschinenenergien

In nachfolgender Abbildung 46 ist die StandBy-Leistung beider Werkzeugmaschinen zu sehen. Die EMCO-Hyperturn hat eine fast doppelte höhere Leistungsaufnahme als die Voest-Weipert. Die Ursache liegt darin, dass während der StandBy-Phase in der EMCO Hyperturn eine größere Anzahl von Komponenten mit Strom versorgt wird. Wird eine Werkzeugmaschine für eine längere Zeit nicht gebraucht, so empfiehlt es sich, die Maschine vom Netz zu schalten. Der Betreiber muss jedoch wissen, dass das Hochfahren der Maschine eine längere Zeit in Anspruch nimmt und vor allem sehr große Werkzeugmaschinen eine relativ lange Zeit zum warmlaufen benötigen.

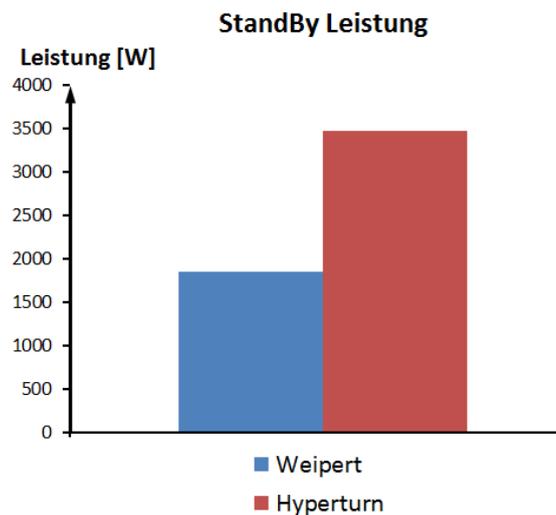


Abbildung 46: StandBy Leistung beider Werkzeugmaschinen

6. Resümee und Ausblick

Diese Arbeit hat das Ziel, Leistungsmessungen an einer spanenden Werkzeugmaschine durchzuführen, damit eine Vergleichbarkeit zwischen ihnen möglich wird. Dafür müssen allgemeine Rahmenbedingungen, wie ein Testwerkstück und Auswertemethode, zuerst definiert werden.

Die durchgeführten Leistungsmessungen haben gezeigt, wie sich der Energiefluss in einer Werkzeugmaschine aufteilt. Vor allem in den größten Verbrauchern steckt ein großes Energieeinsparungspotenzial. Schon ein kleines Einsparungspotenzial bei großen Verbrauchern kann eine große Energiemenge in Summe ergeben. Es muss aber bedacht werden, dass die Messungen mit einem vordefinierten Testwerkstück durchgeführt worden sind. Wird ein anderes Testwerkstück für Leistungsmessungen ausgewählt, so werden sich auch die Ergebnisse ändern. Ein Referenzwerkstück, welches für alle Maschinen geeignet ist, wird es mit großer Wahrscheinlichkeit nicht geben. Dies liegt daran, dass die Werkzeugmaschinen zu unterschiedlich in ihrer Struktur aufgebaut sind. Man kann jede Maschine somit als Unikat ansehen. Für den Kunden ist es am besten, wenn er im Voraus über die Maschinennutzung und über die benötigte Bearbeitungsflexibilität Bescheid weiß. Oft werden Werkzeugmaschinen angeschafft, die über eine Vielzahl von Hilfsantrieben und Komponenten besitzen, aber kaum jemals genutzt werden. Möchte sich der Kunde eine Maschine anschaffen, die nur eine gewisse Bearbeitungsflexibilität aufweisen muss, so kann er selbst ein Testwerkstück definieren. Er kann dem Maschinenhersteller eine spezifische Zerspanungsenergiekurve vorgeben, um die für ihn effizienteste Maschine herstellen zu lassen. Nachteilig wirkt sich mit einem selbst definierten Referenzwerkstück die allgemeine Vergleichbarkeit aus.

Der Retrofit Faktor ist im Allgemeinen ein guter Ansatz zur Bewertung der einzelnen Komponenten. Es wird schnell, einfach und mit geringem Aufwand eine Kennzahl ermittelt, die eine Aussage über die Effizienz einer Komponente oder Baugruppen liefert. Doch hier liegt jedoch im Ansatz ein Schwachpunkt. Es wird in der Normierung von einer Leistungsspitze ausgegangen, welche nicht unbedingt der maximalen Leistung entsprechen muss. Es können kurzzeitige Leistungsspitzen in Motoren entstehen, welche größer der im Datenblatt angegebenen Leistungen sind. Damit dies berücksichtigt werden kann, müsste man eine weitere Kennzahl für den multiplikativen Ansatz einfügen, um diese Problematik zu vermeiden. Auch die derzeitige Auswertemethode des Retrofit Faktors sollte überarbeitet werden, damit das Lastkollektiv richtig bewertet wird. Hier können neue multiplikative Ansätze definiert werden und stellen ein weiteres Forschungsgebiet dar.

Des Weiteren haben die Leistungsmessungen ergeben, dass die Kühlung des Werkstückes eine große Energiemenge benötigt. Die Alternative zu einer Nassbearbeitung ist eine Trockenbearbeitung. Mit einer Trockenbearbeitung kann auf den Einsatz der Kühlmittelpumpen verzichtet werden. Jedoch wird das Werkzeug thermisch stärker belastet und wirkt sich somit negativ auf die Standfestigkeit aus. Außerdem sollen für eine effiziente Bearbeitung möglichst hohe Bearbeitungsgeschwindigkeiten gewählt werden. Die verbrauchte Energie ergibt sich aus der Zeitdauer der benötigten Leistung. Werden hochdynamische Antriebe verwendet, so sind die Leistungsspitzen hoch, aber die Bearbeitungszeit bleibt kurz. Somit ergibt sich ein geringer Energieverbrauch.

Mit den gesammelten Daten aus den Leistungsmessungen könnten auch Verknüpfungen zu CAM-Systemen gemacht werden. Der Konstrukteur bzw. CNC-Bediener könnte im Voraus

die effizienteste Bearbeitung für das Werkstück wählen, um möglichst geringe Bearbeitungskosten zu verursachen. Die Daten müssten durch mehrmalige Leistungsmessungen und einer statistischen Auswertung geprüft werden, bevor sie in ein CAD-System eingegliedert werden können.

Mit der Einführung des Bundesenergiegesetzes werden viele Unternehmer verpflichtet werden, Energieeinsparungen durchzuführen. In produzierenden Unternehmen sind Werkzeugmaschinen große Energieverbraucher. Derzeit gibt es noch keine bestehende Norm für die Auslegung effizienter Werkzeugmaschinen. Doch durch Leistungsmessungen und deren Auswertungen, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt worden sind, soll ein Grundwissen zum Quantifizieren der eingesetzten Komponenten möglich sein. Das Ziel einer Leistungsvermessung ist es, zu sehen, ob die Maschine nicht überdimensioniert für das zu fertigende Bauteil ist. Trifft dies nicht zu, arbeiten die Komponenten im Teillastbereich und es wird unnötig Energie verschwendet. Werkzeugmaschinen sollen auf Grund ihrer Auslegung möglichst im Optimum, im Spitzenlastbereich, betrieben werden.

Mit dem gesammelten Wissen aus den Leistungsmessungen bietet sich die Möglichkeit an, weitere Messungen an verschiedenen Werkzeugmaschinen durchzuführen. Somit eröffnet sich ein Forschungsgebiet, effiziente Werkzeugmaschinen auszulegen und energieeffiziente Bearbeitungsstrategien umzusetzen.

Literaturverzeichnis

- Behrendt T., Zein A., Min S., Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850612001059>, Abfrage vom: 25.2.2014
- Brillinger M., Bachelor Arbeit – Entwicklung eines Testwerkstückes zur Energieeffizienzmessung an Werkzeugmaschinen, TU Graz, 2013
- Dornfeld D., Lead, follow or get run over!, <http://green-manufacturing.blogspot.co.at>, Abfrage vom: 25.2.2014
- Dornfeld D., Standards for Environmental Performance in Manufacturing, <http://www.environmentalleader.com/2010/09/27/standards-for-environmental-performance-in-manufacturing/>, Abfrage vom: 25.2.2014
- Garber T., Hülsemeyer L., NCplus – Effiziente Steuerung von Werkzeugmaschinen, http://www.effizienzfabrik.de/sites/effizienzfabrik/files/dokumente/Effizienzfabrik_Berlin_NCplus.pdf, Abfrage vom: 25.2.2014
- Gontarz A., Hänni F., Weiss L., Wegener K., Machine Toll Optimization Strategies – Evaluation of Actual Machine Tool Usage and Modes, <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:6231/eth-6231-01.pdf>, Abfrage vom: 25.2.2014
- Kuhrke B., Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen, 1. Auflage, Darmstadt 2011, ISBN:978-3-8442-1461-1
- Newman S.T., Nassehi A., Imani-Asrai R., Dhokia V., Energy efficient process planning for CNC machining, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581712000223>, Abfrage vom: 25.2.2014
- N.N., Bundes-Energieeffizienzgesetz, http://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXIV/II/I_02249/index.shtml , Abfrage vom: 25.2.2014
- N.N., Einteilung der Fertigungsverfahren, <http://www.fachwissen-technik.de/verfahren/fertigungsverfahren.html>, Abfrage vom 25.2.2014
- N.N., Kyoto-Protokoll, http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/kyoto_protokoll_1108.htm, Abfrage vom: 23.2.2014
- N.N., Richtlinie 2009/125/EG des europäischen Parlamentes und des Rates, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:de:PDF>, Abfrage vom: 23.2.2014
- N.N., Richtlinie 2012/27/EG des europäischen Parlamentes und des Rates, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:315:0001:0056:DE:PDF>, Abfrage vom: 23.2.2014
- N.N., Österreich Energie – Strompreisentwicklung, http://oesterreichsenergie.at/files/oesterreichsenergie.at/Downloads%20Daten%20und%20Fakten%20-%20Statistik/Jpg%20Juni%202013/04_Strompreisentwicklung_unter_Entwicklung_anderer_Energietraeger.jpg, Abfrage vom: 24.2.2014

Paucksch E., Holsten S., Linß M., Trikal F., Zerspanungstechnik, Kassel/Lüneburg
2008, 12. Auflage, ISBN: 978-3-8348-0279-8

Plaßmann W., Elektrotechnik, in: Schultz D. (Hrsg.), Handbuch der Elektrotechnik,
Hannover/Hamburg 2012, ISBN: 978-3-8348-1021-2

Teiglkötter J., Energieeffiziente elektrische Antriebe, Aschaffenburg 2012, 1. Auflage, ISBN
978-3-8348-1938-3

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strompreisentwicklung.....	10
Abbildung 2: Lebenszyklus eines Produktes.....	11
Abbildung 3: Einteilung der Fertigungsverfahren nach DIN 8580.....	14
Abbildung 4: Einflussfaktoren einer Werkzeugmaschine	15
Abbildung 5: Beispiel einer Effizienzplakette	16
Abbildung 6: a) Voest Weipert WNC-500S b) EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	17
Abbildung 7: Wirk- und Blindstrom in einem Zeigerdiagramm.....	18
Abbildung 8: Wirk- und Blindleistung in einem Zeigerdiagramm	18
Abbildung 9: Ausrüstung für die Leistungsmessung	20
Abbildung 10: a) Rogowski Spule in Natura b) Aufbau einer Rogowski Spule	21
Abbildung 11: a) Stromzange in Natura b) Funktionsweise eine Stromzange.....	21
Abbildung 12: Benutzeroberfläche von DEWEsoft™.....	22
Abbildung 13: Testwerkstücke nach Newman, Nassehi, Asrai und Dhoka a) Testwerkstück mit komplexer Geometrie b) Testwerkstück mit Nuten.....	23
Abbildung 14: Testwerkstück nach Behrendt T.....	24
Abbildung 15: Fixer und variabler Energieanteil in einer Werkzeugmaschine	25
Abbildung 16: Referenzwerkstück laut Arbeitsgruppe NC+.....	25
Abbildung 17: Testwerkstück für Drehmaschinen nach Brillinger M.....	26
Abbildung 18: Testwerkstück für Fräsmaschinen nach Brillinger M.	27
Abbildung 19: Zerspanungsparameter beim Außen- und Innendrehen.....	28
Abbildung 20: Gesamtleistungsaufnahme der EMCO Hyperturn-665MCplus	31
Abbildung 21: Leistungsverlauf der Frässpindel bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	32
Abbildung 22: Leistungsverlauf der Hydraulik bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	33
Abbildung 23: Leistungsverlauf der B-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	34
Abbildung 24: Komponenten und Hilfsachsen der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	35
Abbildung 25: Leistungsverlauf des Werkzeugmagazins bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	36
Abbildung 26: Leistungsverlauf der Kühlmittelpumpe-WZW bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	36
Abbildung 27: Leistungsverlauf der Kühlmittelpumpe-Frässpindel bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	37
Abbildung 28: Kühlmittelaustritt a) Werkzeugwender b) Fräsblock	38
Abbildung 29: Leistungsverlauf des Kühlaggregates bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	38
Abbildung 30: Leistungsverlauf der X1-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	39
Abbildung 31: Leistungsverlauf der Z1-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	40
Abbildung 32: Leistungsverlauf der X2-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	41
Abbildung 33: Leistungsverlauf der Z2-Achse bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus	41

Abbildung 34: Leistungsverlauf der Hauptspindel bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	42
Abbildung 35: Leistungsverlauf der Hauptspindel ohne Material bei der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	43
Abbildung 36: Zerspanungsenergie in Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens.....	45
Abbildung 37: Spezifische Maschinenenergie in Abhängigkeit des Zerspanungsvolumens ..	46
Abbildung 38: Darstellung der Energieaufteilung in einer Werkzeugmaschine	47
Abbildung 39: Definition der Zeitgrenzen für die Bestimmung des Retrofit Faktors.....	48
Abbildung 40: Normierung der Leistung und der Zeit.....	49
Abbildung 41: Bestimmung des Regressionswinkels α_i	49
Abbildung 42: Energieaufteilung in der EMCO Hyperturn-665MCPlus.....	51
Abbildung 43: Gesamtleistungsverläufe beider Werkzeugmaschinen.....	53
Abbildung 44: Zerspanungsenergie der Voest Weipert WNC-500S	55
Abbildung 45: Vergleich beider spezifischen Gesamtmaschinenenergien	57
Abbildung 46: StandBy Leistung beider Werkzeugmaschinen	57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zerspanungsparameter für das Testwerkstück	28
Tabelle 2: Bohrparameter	29
Tabelle 3: Zerspanungsenergie des Testwerkstückes mit der EMCO Hyperturn-665MCPlus	44
Tabelle 4: Retrofit Faktoren und Energiebedarf der einzelnen Komponenten	50
Tabelle 5: Retrofit Faktoren beider Hauptspindeln	54
Tabelle 6: Spezifische-Maschinenenergie der Voest Weipert WNC-500S	56

Anhang

A1

TECHNISCHE DATEN

Technische Daten der Maschine

Arbeitsbereich		Hyperturn 645	Hyperturn 665
Umlaufdurchmesser über Bett	[mm]	ø600	
Umlaufdurchmesser über Planschlitten	[mm]	ø500	
Abstand Hauptspindel - Gegenspindel	[mm]	1000	975
Max. Drehdurchmesser	[mm]	ø430	
Max. Drehlänge	[mm]	744	
Max. Werkstückgrösse mit Gegenspindel	[mm]	ø160x200	ø200x200
Max. Stangendurchmesser	[mm]	ø45	ø65
Verfahrenbereiche			
Verfahrweg X/Z - X2/Z2	[mm]	270/750 - 205/750	
Verfahrweg X/Z - X2/Z2 mit B-Achse/QuickMill	[mm]	280/750 - 205/750	
Y-Achse			
Verfahrenbereich	[mm]	100 (±50)	
Vorschubkraft	[N]	5000	
Hauptspindel (Spindel 1)		Hyperturn 645	Hyperturn 665
Spindelanschluss nach DIN 55 026		KK 5	KK 6
Spindelaußendurchmesser im vorderen Lager	[mm]	ø85	ø105
Spindelbohrung (ohne Zugrohr)	[mm]	ø53	ø73
Hauptspindel-Spannsystem (wahlweise)		Hyperturn 645	Hyperturn 665
Hohlspannzylinder mit Zugrohr, Durchlass max.	[mm]	ø45	ø65
Vollspannzylinder mit Zugstange für Futterteile bis	[mm]	ø160	ø200
Max. Futtergrösse	[mm]	ø160	ø200
Hauptspindel-Antrieb		Hyperturn 645	Hyperturn 665
AC-Hohlspindelmotor, Leistung (100%, 40% ED)	[kW]	17/22	21/29
Drehzahlbereich (stufenlos regelbar)	[min ⁻¹]	0-7000	0-5000
Max. Drehmoment	[Nm]	130	250
Gegenspindel (Spindel 2)		Hyperturn 645	Hyperturn 665
Spindelanschluss nach DIN 55 026		KK 5	KK 6
Spindelaußendurchmesser im vorderen Lager	[mm]	ø85	
Verfahrweg Z3	[mm]	750	
Verfahrgeschwindigkeit	[m/min]	30	
Haltekraft	[N]	9000	
Gegenspindel-Spannsystem (wahlweise)		Hyperturn 645	Hyperturn 665
Vollspannzylinder mit Zugstange für Futterteile bis	[mm]	ø180	
Max. Futtergrösse	[mm]	ø200	
Gegenspindel-Antrieb		Hyperturn 645	Hyperturn 665
AC-Hohlspindelmotor, Leistung (100%, 40% ED)	[kW]	17/22	
Drehzahlbereich (stufenlos regelbar)	[min ⁻¹]	0-7000	
Max. Drehmoment	[Nm]	130	
C-Achse (Spindel 1 und 2)			
Auflösung der Rundachse	[°]	0,001	
Eilgang	[min ⁻¹]	1000	

Technische Änderungen vorbehalten!

A2

TECHNISCHE DATEN

Vorschubantriebe		
Eilganggeschwindigkeit X/Y/Z	[m/min]	24/10/30
Vorschubkraft X/X2	[N]	5000
Vorschubkraft Z/Z2	[N]	8000
Werkzeugsystem oben/unten - Standard		
Scheibenrevolver mit Richtungslogik, wahlweise mit angetriebenen Werkzeugen		
Werkzeugaufnahmen nach DIN 69880		VDI 30
Anzahl der Werkzeugstationen		12
Werkzeugwechselzeit	[s]	0,14
Schaltgenauigkeit auf Radius 100mm	[μ m]	± 2
Wiederholgenauigkeit auf Radius 100 mm	[μ m]	$\pm 0,8$
Angetriebene Werkzeugstationen (optional)		
Anzahl der angetriebenen Werkzeugstationen		12
Max. Drehmoment	[Nm]	25
Antriebsleistung	[kW]	6,7
Drehzahlbereich	[min ⁻¹]	0-4000
Werkzeugsystem oben - B-Achse/QuickMill (Option)		
Scheibenrevolver mit Richtungslogik		
Werkzeugaufnahmen nach DIN 69880		VDI 30
Anzahl der Werkzeugstationen, davon angetrieben		12/12
Werkzeugwechselzeit	[s]	0,14
Schaltgenauigkeit auf Radius 100mm	[μ m]	± 2
Wiederholgenauigkeit auf Radius 100 mm	[μ m]	$\pm 0,8$
Max. Drehmoment	[Nm]	25
Antriebsleistung	[kW]	6,7
Drehzahlbereich	[min ⁻¹]	0-4000
Schwenkbereich (stufenlos)	[°]	45
Teilgenauigkeit der Indexierung (alle 5°)	["]	± 4
Haltemoment der Indexierung (alle 5°)	[Nm]	3000
Haltemoment der Klemmung mit 0,1° Auflösung	[Nm]	600
Antriebsmoment bei Interpolation	[Nm]	400
Hydraulik		
Mehrkreisshydraulik für Kraftspannmittel		
Füllmenge	[l]	10
Max. Druck für Spannmittel	[bar]	60
Pneumatik		
Versorgungsdruck	[bar]	6
Versorgungsmenge	[l/h]	300
Schmiersystem		
Führungsbahnen, Kugelgewindespindeln		autom. Ölzentral schmierung
Hauptspindel, Gegenspindel		Fettschmierung

Technische Änderungen vorbehalten!

A3

TECHNISCHE DATEN

Kühlmitteleinrichtung			
Behälterinhalt	[l]	300	
Kühlmitteldruck / WZ-Revolver	[bar]	14	
interne Kühlmittelzuleitung		über Werkzeugrevolver	
Stangenvorschub			
serienmäßige Vorbereitung für den Anbau eines Stangenvorschubes			
Späneförderer			
Anschlüsse für Späneförderer in Grundmaschine enthalten			
Pneumatische Teileauffangschale			
Betätigungsdruck	[bar]	6	
Max. Fertigteillänge	[mm]	200	
Max. Fertigteildurchmesser	[mm]	ø65	
Max. Fertigteilgewicht	[kg]	4,5	
Elektrischer Anschluss			
Spannungsversorgung	[V]	400 ~3/PE	
Max. Spannungsschwankungen	[%]	+10 / -10	
Frequenz	[Hz]	50/60	
Anschlusswert der Maschine	[kVA]	46	
Vorsicherung für die Maschine	[A/gG, gL]	80	
Erforderliche Kurzschlussleistung	[kVA]	2500	
Kurzschlussfestigkeit	[kA _{eff}]	10	
Zuleitungsquerschnitt	[mm ²]	4 × 25	
Betriebsbedingung			
erforderliche Umgebungstemperatur	[°C]	min. +10 bis max. +35	
Abmessungen/Gewicht			
Höhe der Drehachse über Flur	[mm]	1200	
Gesamthöhe	[mm]	2300	
Aufstellfläche B×T (ohne Späneförderer)	[mm]	3400 × 2550	
Gesamtgewicht der Maschine	[kg]	7600	
Schalldruckpegel		Hyperturn 645	Hyperturn 665
gemittelter Schalldruckpegel	[db (A)]	78	76
Bei folgenden Bedingungen:			
Meßverfahren: Hüllflächenmeßverfahren nach DIN 45 635			
Meßpunkt: m Abstand und 1,6m über dem Boden			
Betriebszustand: Höchstdrehzahl im Leerlauf			

Technische Änderungen vorbehalten!

A4

TECHNISCHE BESCHREIBUNG



TECHNISCHE DATEN

Arbeitsbereich:

max. Dreh- \emptyset zwischen Spitzen	mm	380
Umlauf- \emptyset über Bett	mm	540
Umlauf- \emptyset über Schlitten	mm	450

Z-Achsen-Maschine:

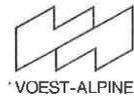
Schlittenweg längs (Z-Achse)	mm	1200
plan (X-Achse)	mm	300
Spitzenweite	mm	1000

Hauptspindel

max. Drehzahl	min ⁻¹	4000
Spindel- \emptyset im vorderen Lager	mm	120
Bohrungs- \emptyset der Spindel	mm	77
Spindelkopf	DIN/Gr.	55026/8

A5

TECHNISCHE BESCHREIBUNG



Hauptantrieb:

2-stufiges Getriebe, n max. 4000 min⁻¹

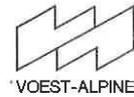
Nennleistung bei 100 % ED		kW	35
max. Drehmoment an der Spindel		Nm	1000
Gesamtdrehzahlbereich		min ⁻¹	25-4000
Drehzahlbereich I		min ⁻¹	25-1000
max. Drehmoment		Nm	1000
Drehzahlbereich II		min ⁻¹	100-4000
max. Drehmoment		Nm	250

Vorschubgetriebe:

max. Drehmoment an der Kugelgewindespindel			
bei 100 % ED	längs	Nm	24
	plan	Nm	17
Vorschubkraft			
bei 100 % ED	längs	N	12000
	plan	N	8000
max. Bahnvorschub		mm/min.	5000
max. Eilgang		mm/min.	10000

A6

TECHNISCHE BESCHREIBUNG



Kugelgewindespindel:

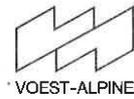
Durchmesser längs (Z-Achse oben)	mm	50
plan	mm	40
Steigung längs und plan	mm	10
Lineares Wegmeßsystem in der X-Achse		
Rotatives Wegmeßsystem in der Z-Achse		

Werkzeugsystem:

Scheibenrevolver Anzahl der Schaltstellungen		12
zul. Vorschubkraft max.	N	25000
zul. Tangentialmoment (indexiert)	Nm	6000
max. Spanquerschnitt in St.60	mm ²	6,3
Taktzeit je Schaltschritt 30°	s	0,6
Schaltzeit für 180°	s	2,1

A7

TECHNISCHE BESCHREIBUNG



VDI-Aufnahme, VDI 3425 B1. 2, 12-fach

Nenngröße	mm	25
Schaft- \emptyset	mm	50

Reitstock

Pinolenhub	mm	125
Pinolendurchmesser	mm	100
Pinoleneinstellkraft einstellbar	N	1250-12500
Pinolenverfahrensgeschwindigkeit	mm/s	80
Mitlaufende eingesetzte Körnerspitze Kegelaufnahme	Morse	5
Manuelle Klemmung und Koppelung mit dem Schlitten		

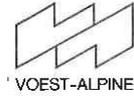
Hydraulischer Spannzyylinder am Hauptspindelende:

Teilhohlspannung:

Hub	mm	50
Spannkraft bei 30 bar	N	67500

A8

TECHNISCHE BESCHREIBUNG



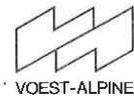
Scheibe 12-fach mit angetriebenen Werkzeugen (max. 6) und Drehwerkzeugen

Werkzeugantrieb AC-Motor und 2-stufiges, autom. schaltendes Getriebe.

Leistung an den angetriebenen Werkzeugen	kW	3,6
max. Drehmoment an den Fräswerken	Nm	46
Gesamtdrehzahlbereich	min ⁻¹	20 - 3000
Drehzahlbereich I	min ⁻¹	20 - 750
max. Drehmoment	Nm	46
Drehzahlbereich II	min ⁻¹	80 - 3000
max. Drehmoment	Nm	11,5
Spannzangenaufnahme: Spannbereich	mm	2 - 25
Stellhülseaufnahme DIN 6327 Bl. 2		D28
Zylinderschaftaufnahme VDI 3425 Bl. 2		
Schaftdurchmesser	mm	40
Positionierung und Klemmung der Hauptspindel über Zahnrad und hydraulisch betätigtes Zahnsegment		
Kleinster Teilschnitt der Hauptspindel	Grad	1

A9

TECHNISCHE BESCHREIBUNG



Spannmittel:

Teilhohlspannung

Kraftbetätigtes Dreibackenfutter FORKARDT
Type 3 KTNC 250
mit Handentriegelung

Futterdurchmesser	mm	250
Durchgangsbohrung	mm	52

Spänetransport und Kühleinrichtung

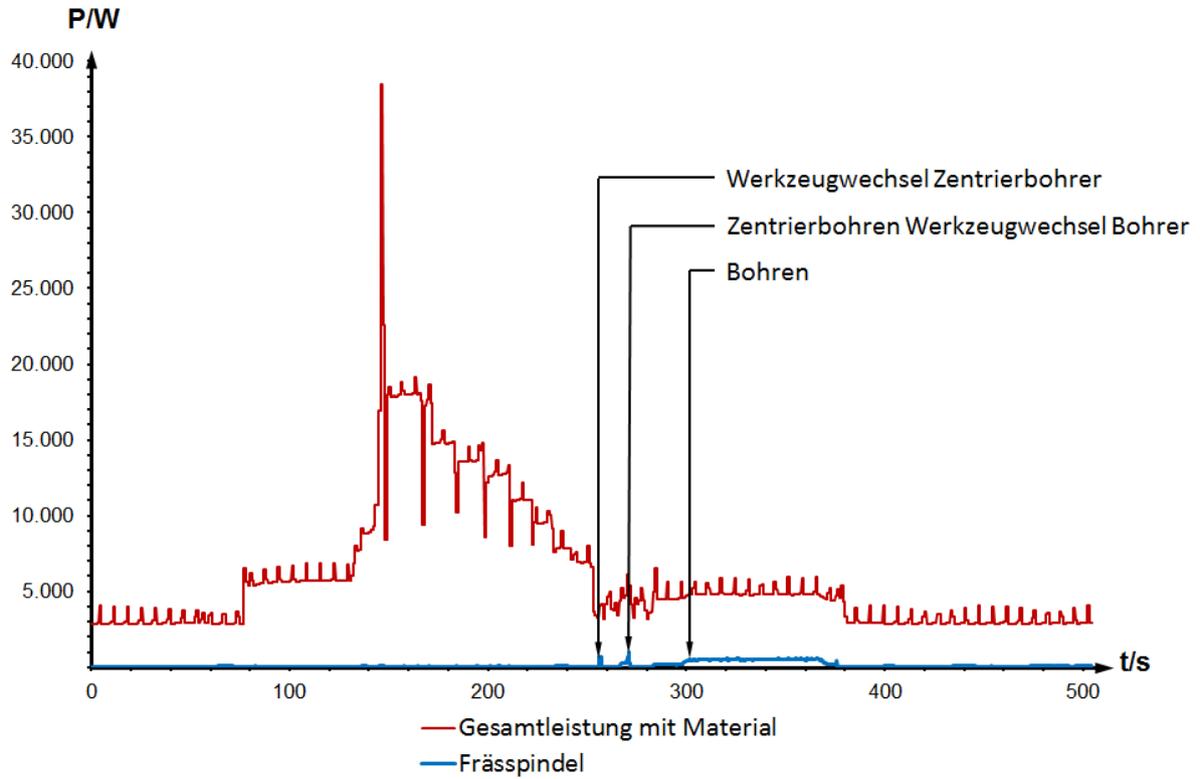
Abwurfhöhe	mm	1100
Behälterhöhe (kundenseitig)	mm	800
Bandbreite	mm	225
Getriebemotor	kW	0,3
Kühlmittelbehälterinhalt	L	150

Allgemeines

Höhe der Drehspindel über Flur	mm	1100
Geräuschpegel (ohne Bearbeitung und Futter)	dB(A)	80
Maschinenleuchte (Kaltlicht)	W	2x20
Gewicht netto, bei Sp.W. 1000 mm	kg	8500

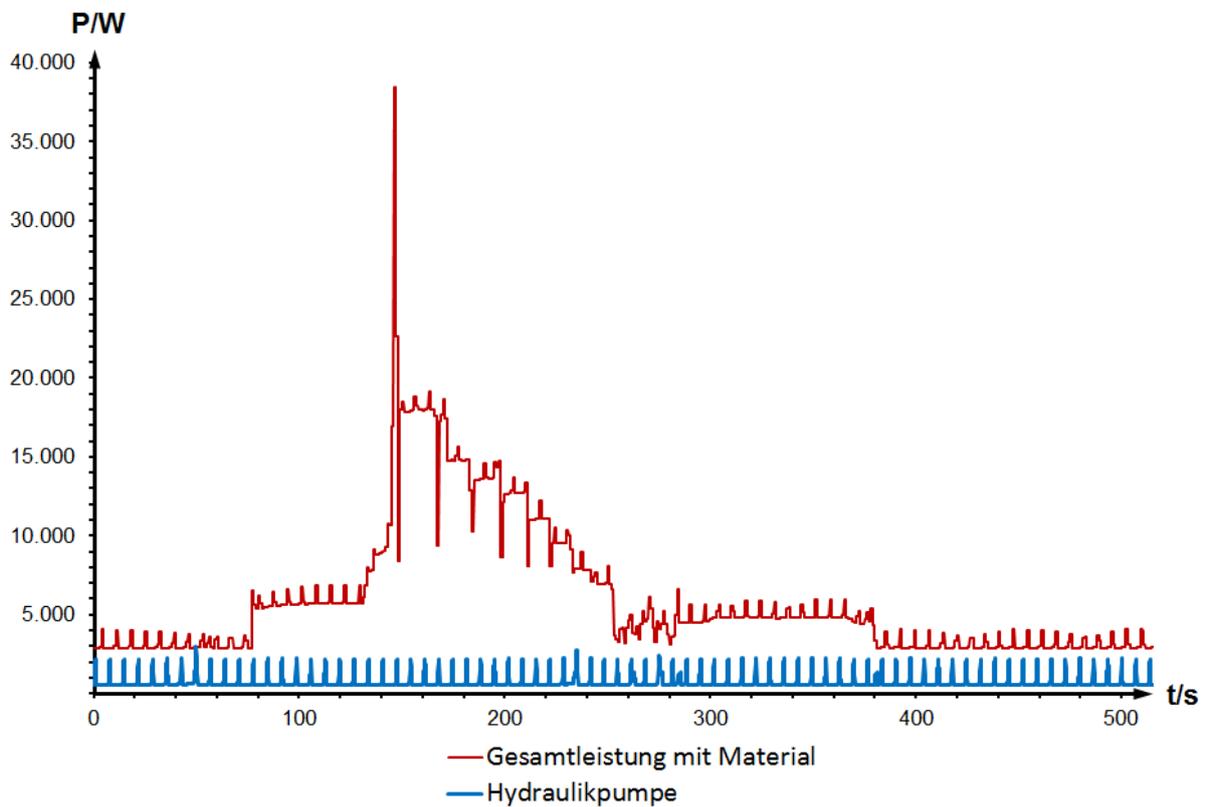
A11

Leistungsaufnahme Frässpindel im Vergleich zur Gesamtleistung



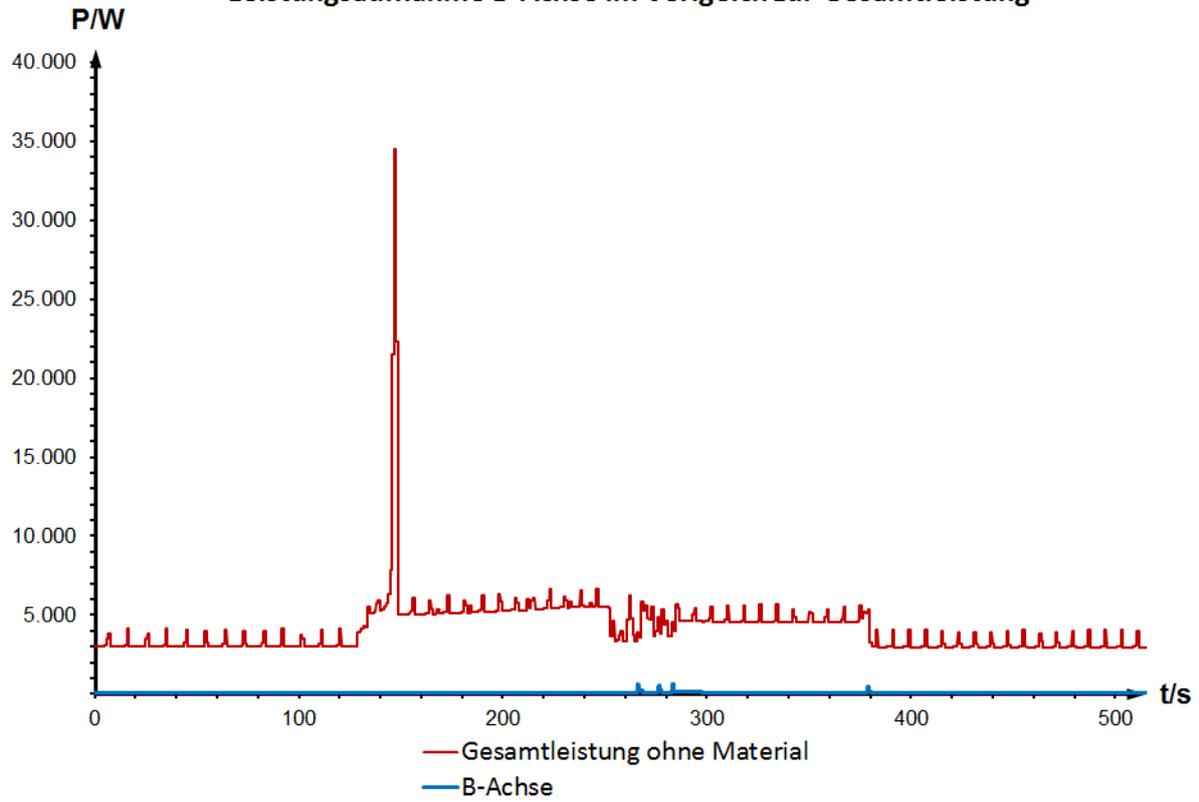
A12

Leistungsaufnahme Hydraulik im Vergleich zur Gesamtleistung



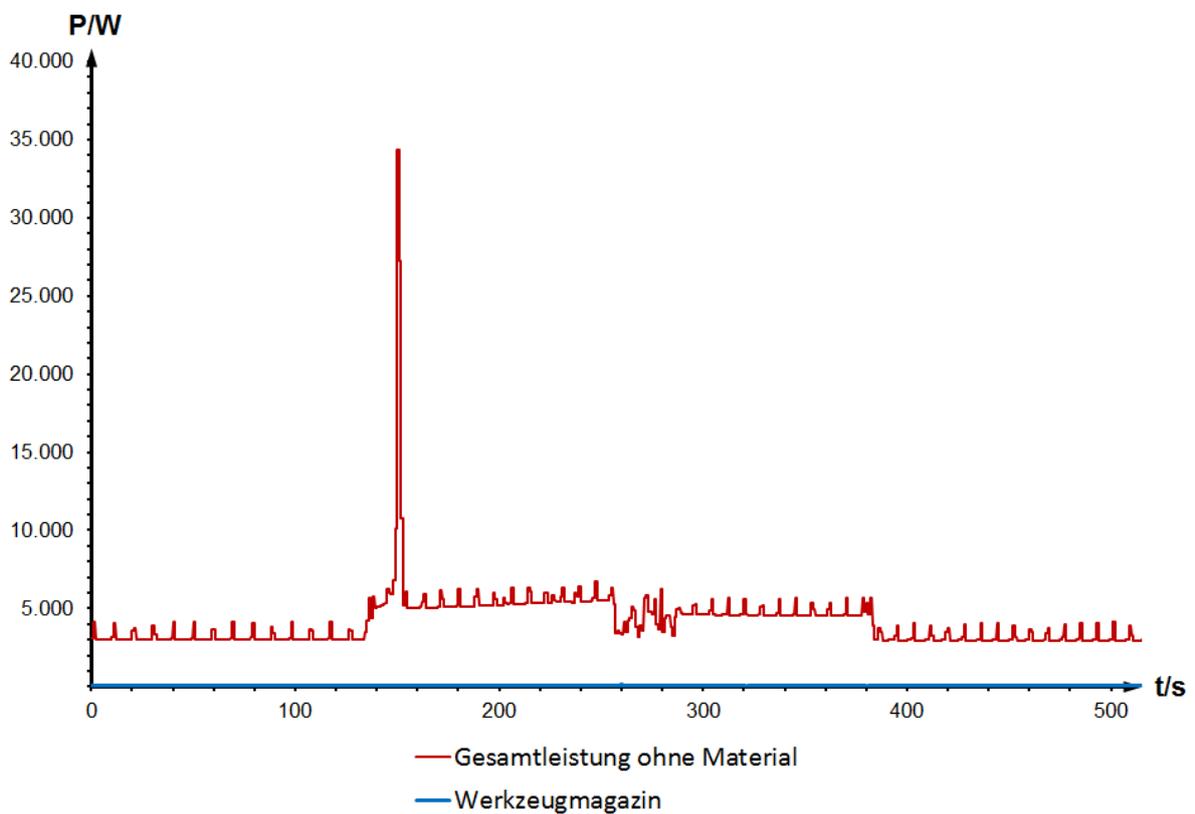
A13

Leistungsaufnahme B-Achse im Vergleich zur Gesamtleistung



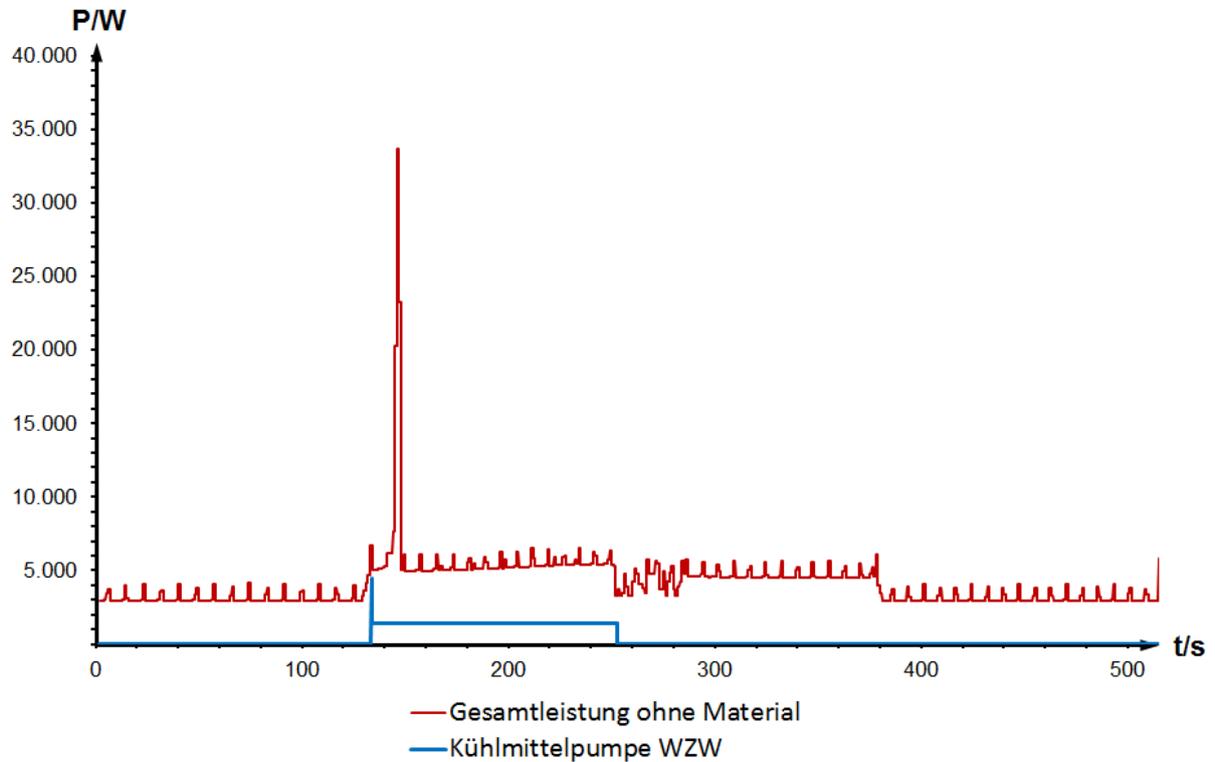
A14

Leistungsaufnahme Werkzeugmagazin im Vergleich zur Gesamtleistung



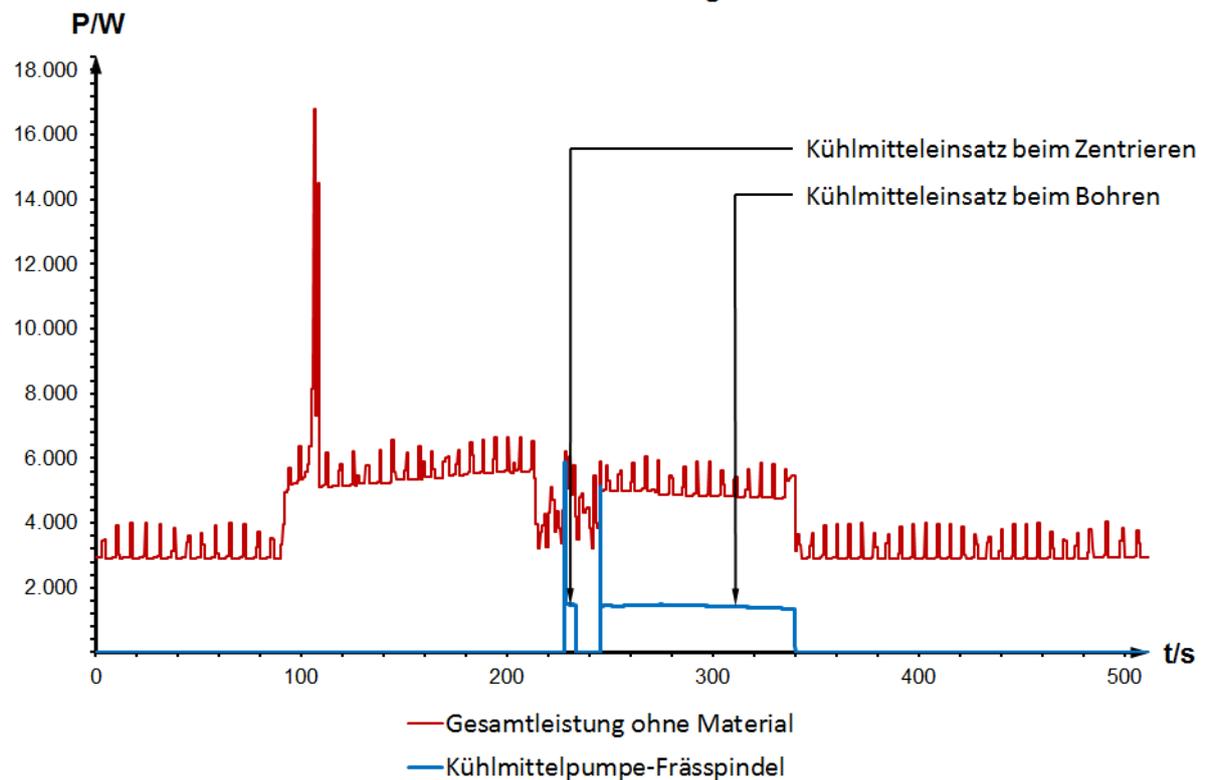
A15

Leistungsaufnahme Kühlmittelpumpe-WZW im Vergleich zur Gesamtleistung



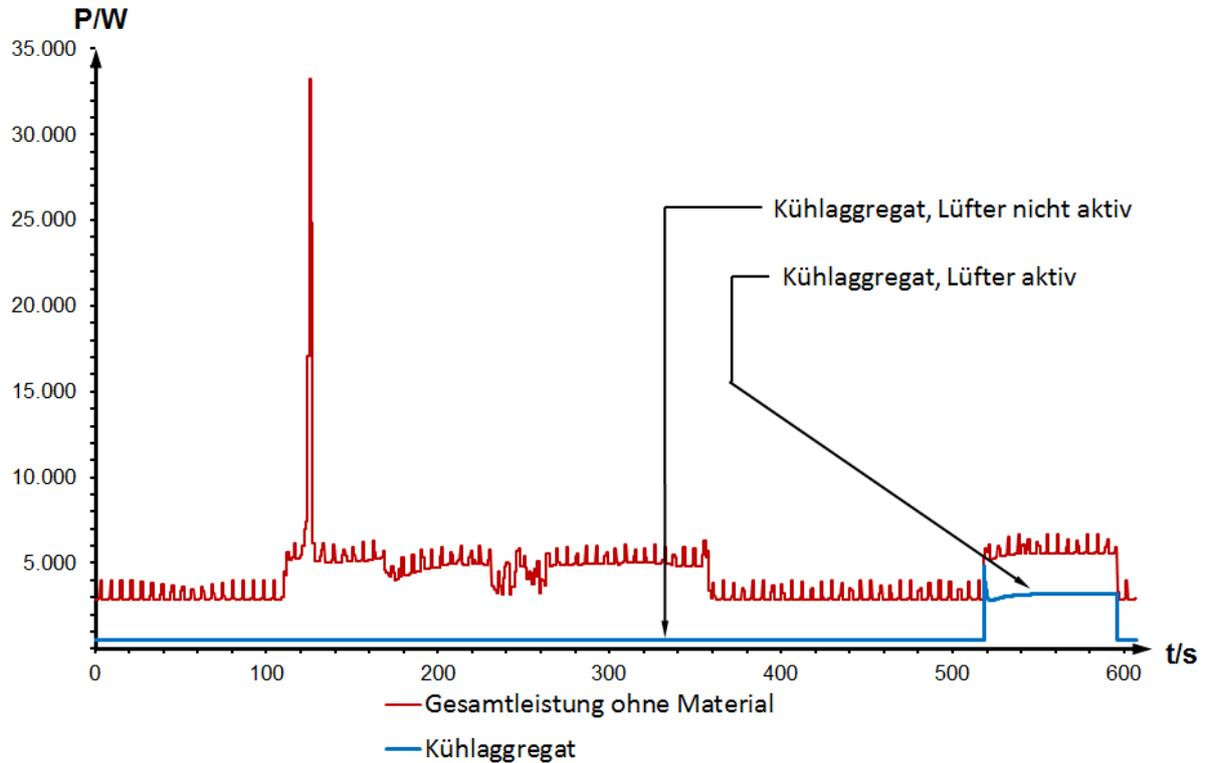
A16

Leistungsaufnahme Kühlmittelpumpe-Frässpindel im Vergleich zur Gesamtleistung



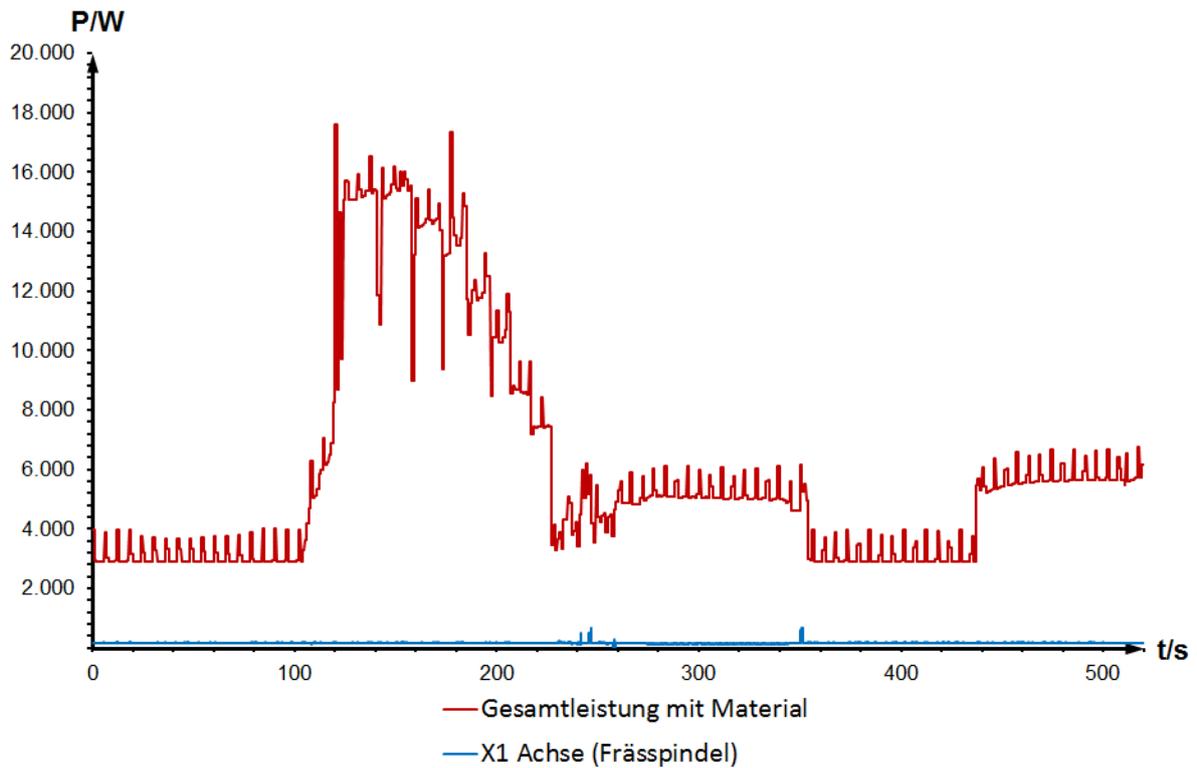
A17

Leistungsaufnahme Kühlaggregat im Vergleich zur Gesamtleistung



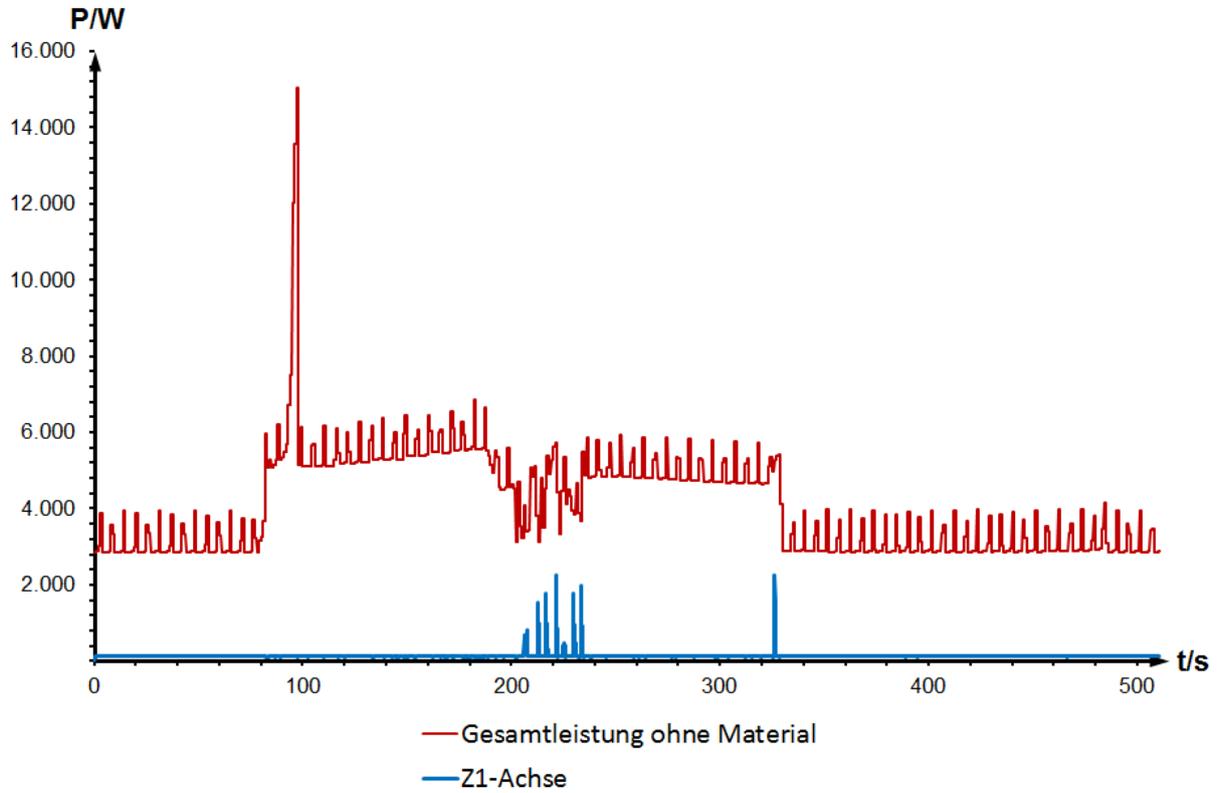
A18

Leistungsaufnahme X1-Achse im Vergleich zur Gesamtleistung



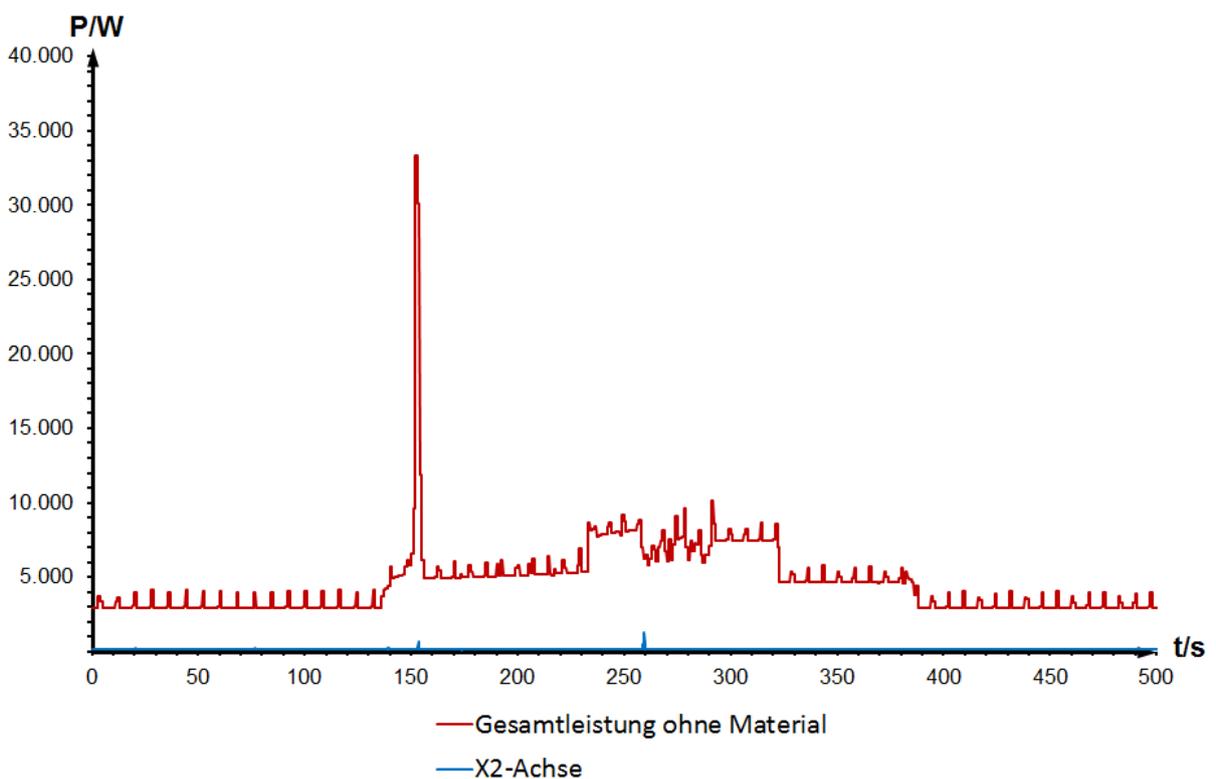
A19

Leistungsaufnahme Z1-Achse im Vergleich zur Gesamtleistung



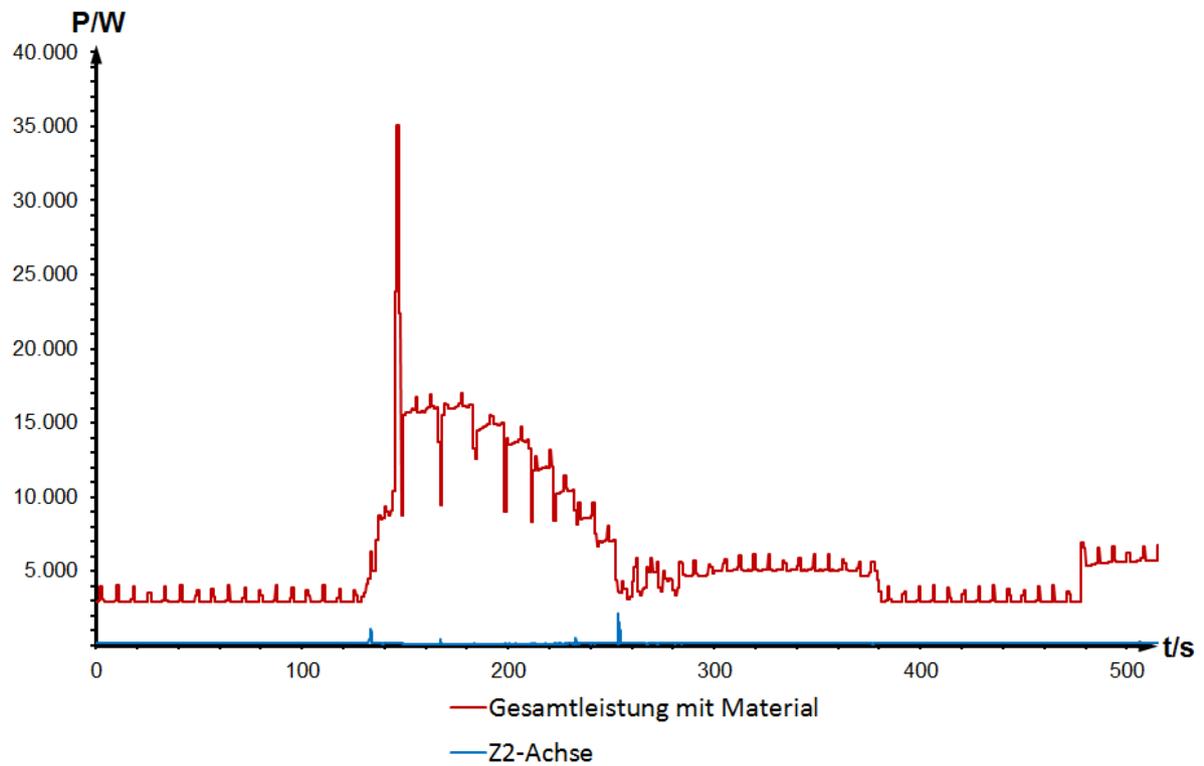
A20

Leistungsaufnahme X2-Achse im Vergleich zur Gesamtleistung



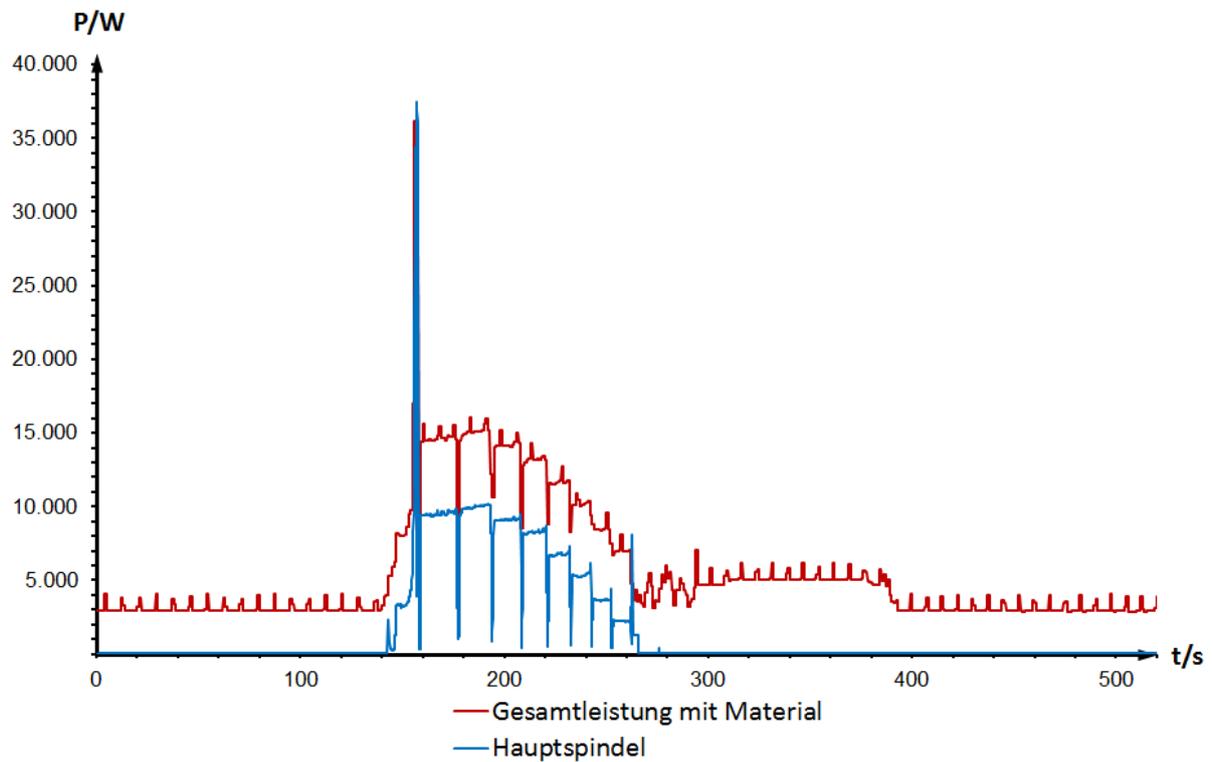
A21

Leistungsaufnahme Z2-Achse im Vergleich zur Gesamtleistung



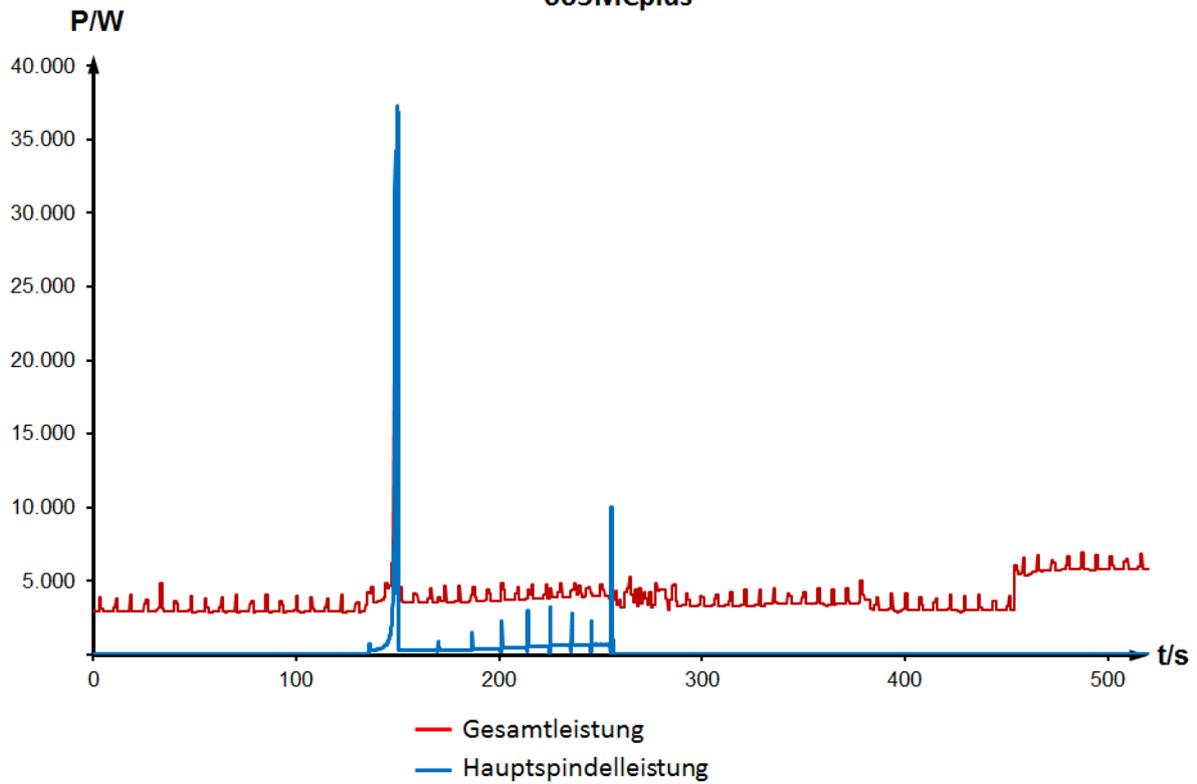
A22

Leistungsaufnahme Hauptspindel im Vergleich zur Gesamtleistung



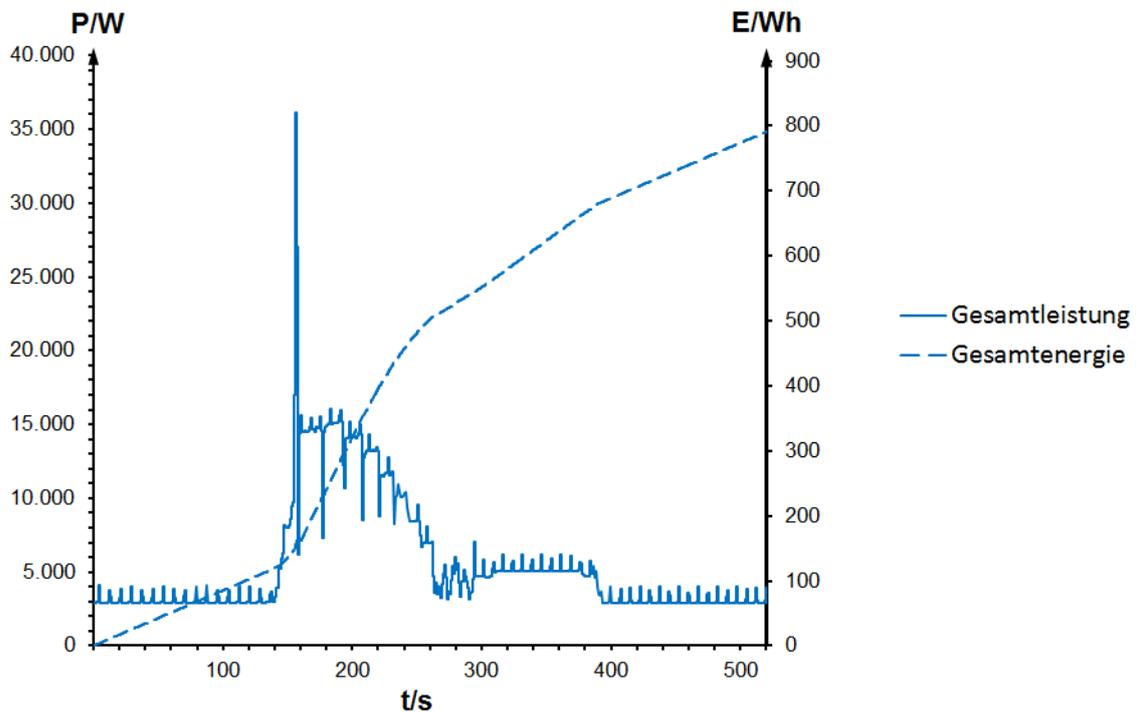
A23

Leistungsaufnahme Hauptspindel ohne Material der EMCO-Hyperturn
665MCplus



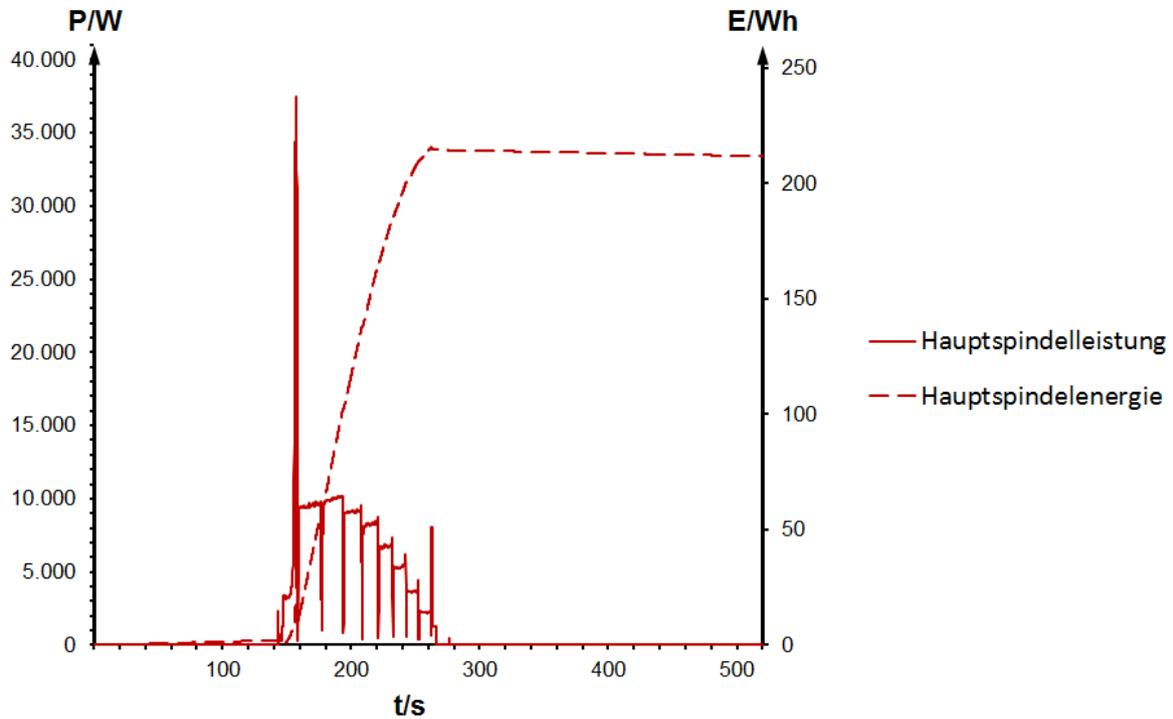
A24

Gesamtleistungs- und Gesamtenergieverlauf der EMCO Hyperturn-
655MCplus



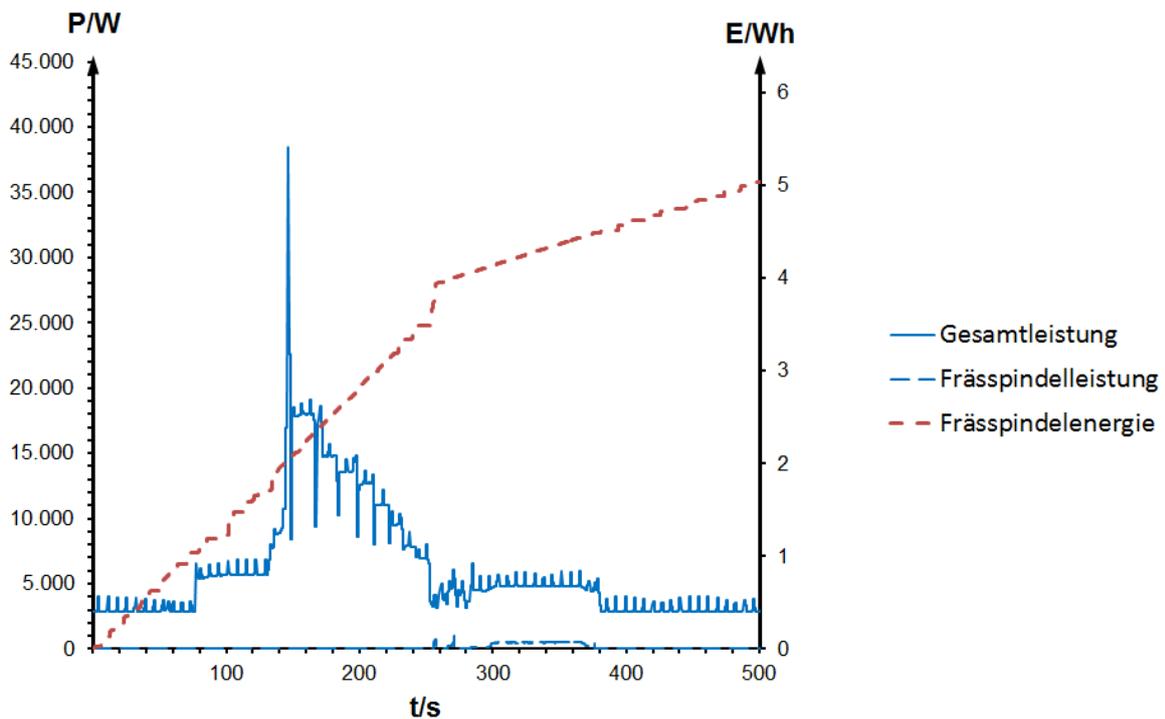
A25

Hauptspindelleistungs- und Hauptspindelenergieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



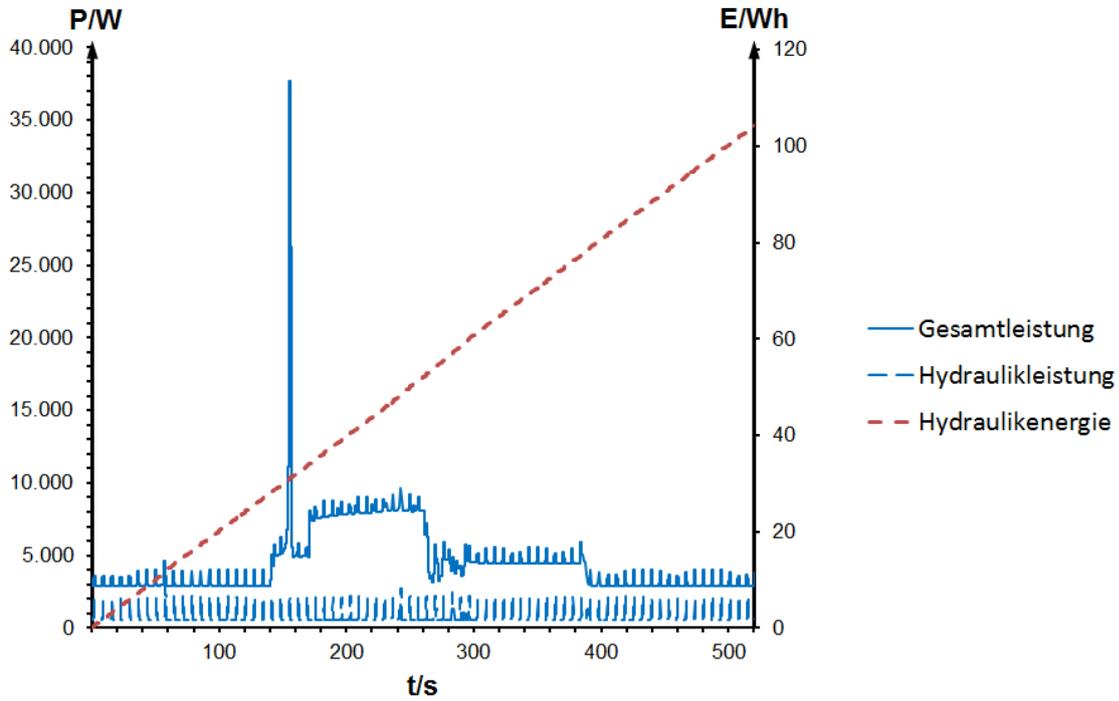
A26

Frässpindelleistungs- und Frässpindelenergieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



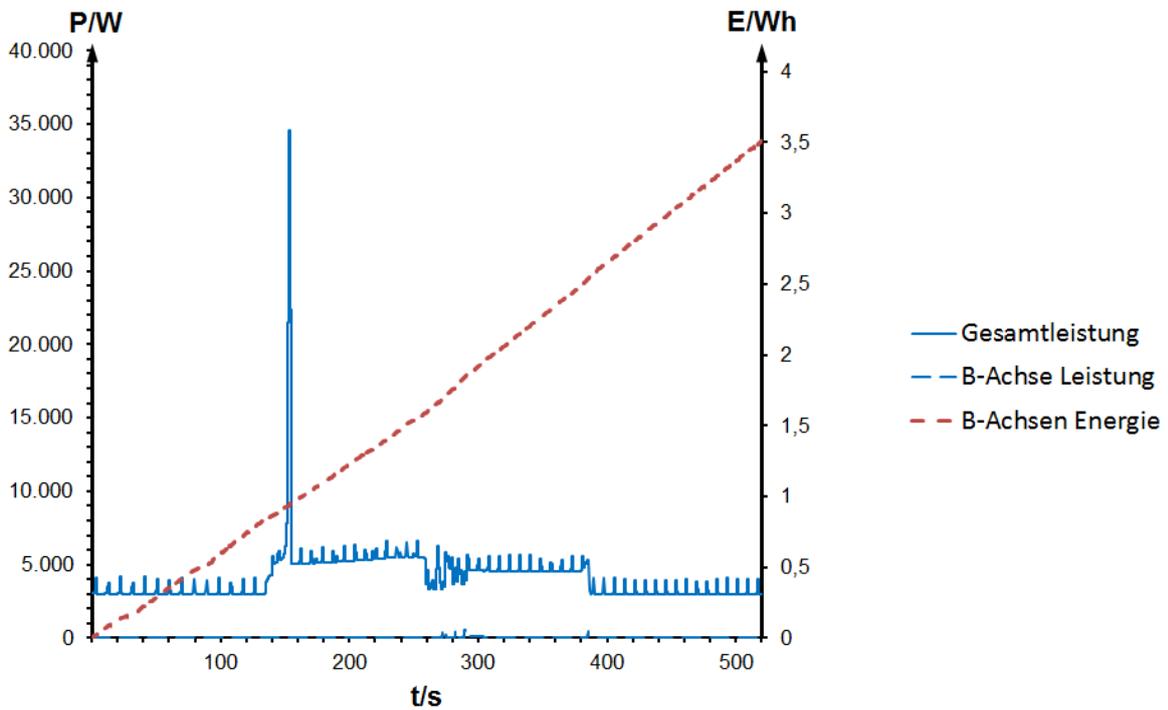
A27

Hydraulikleistungs- und Hydraulikenergieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



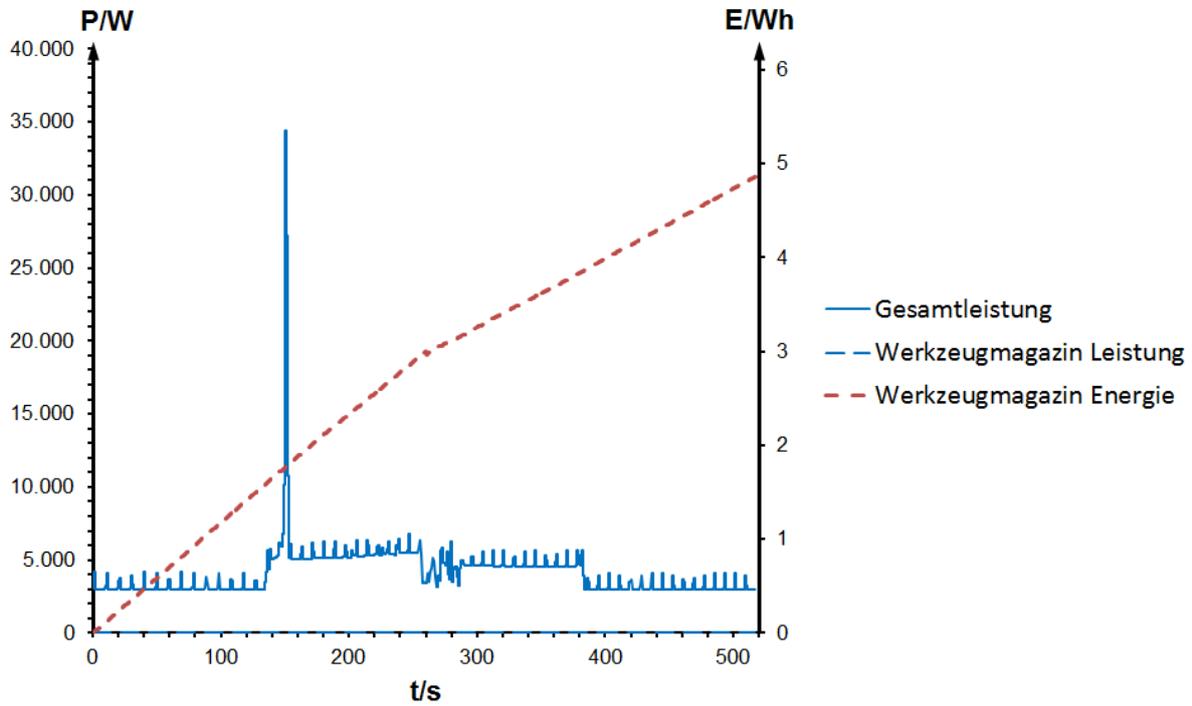
A28

B-Achse Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



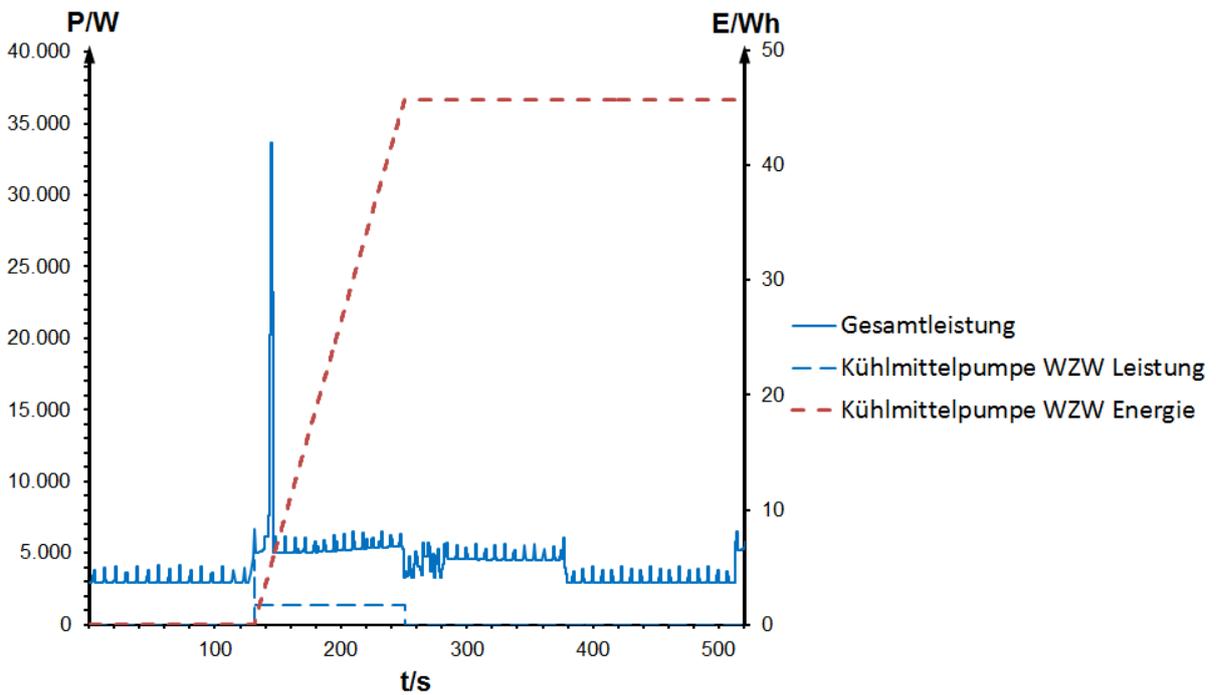
A29

Werkzeugmagazin Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



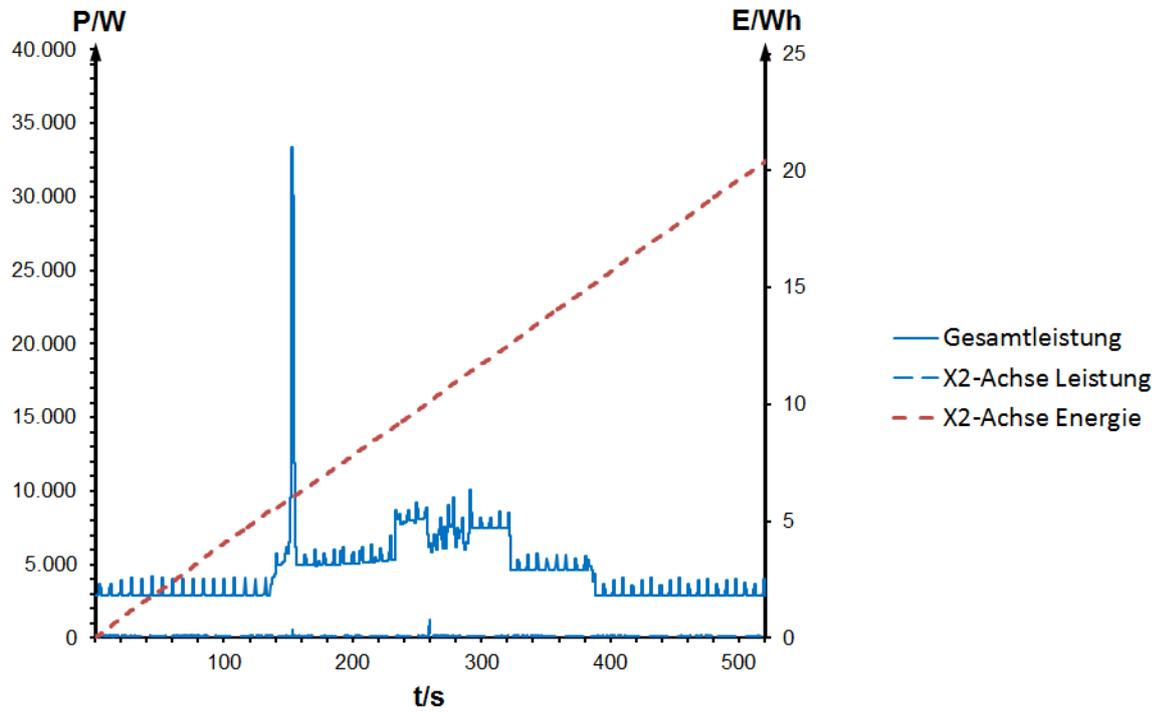
A30

Kühlmittelpumpe-WZW Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



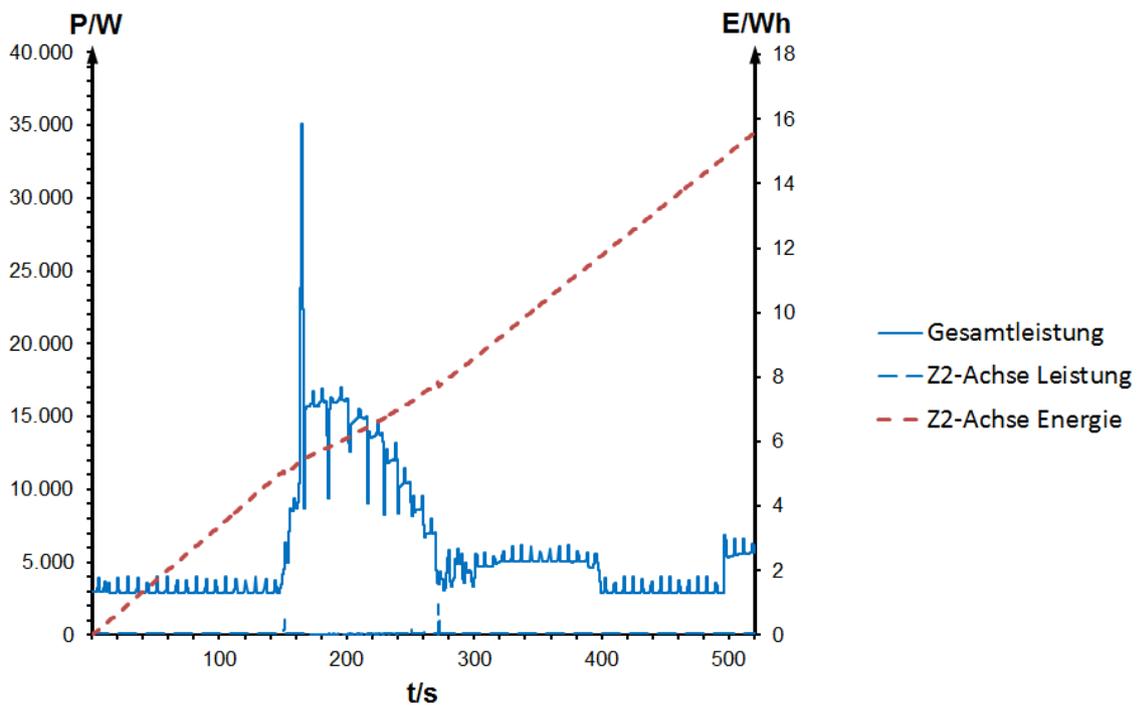
A31

X2-Achse Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



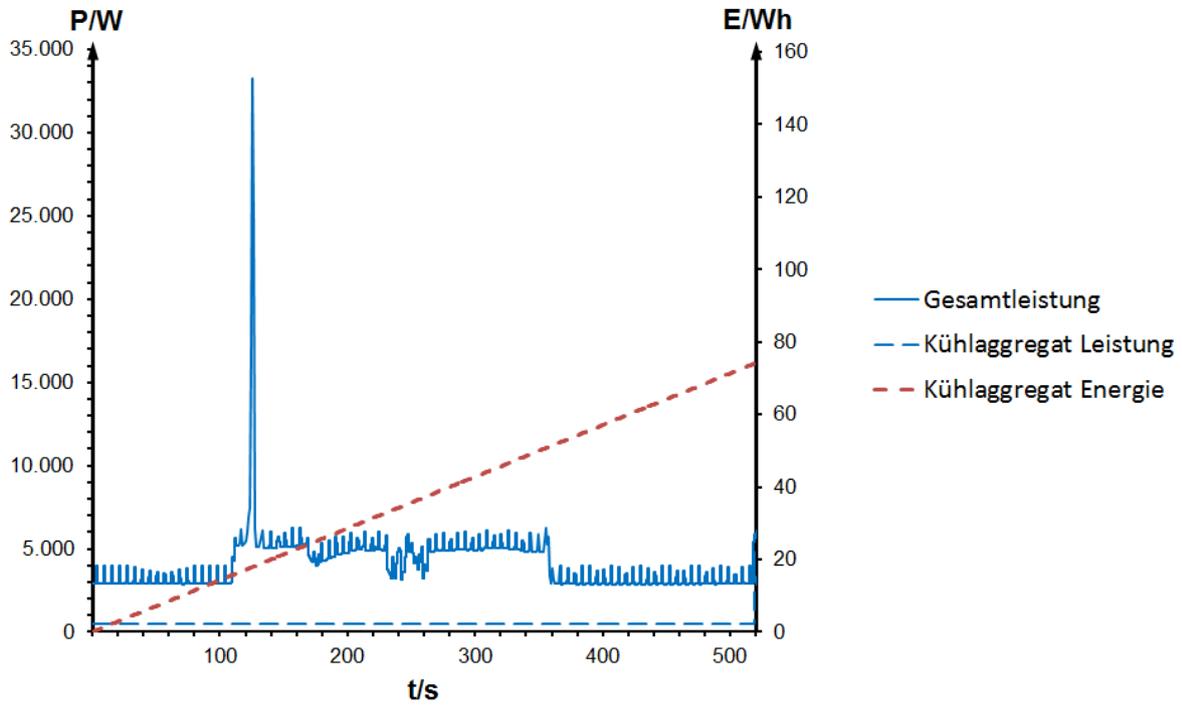
A32

Z2-Achse Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



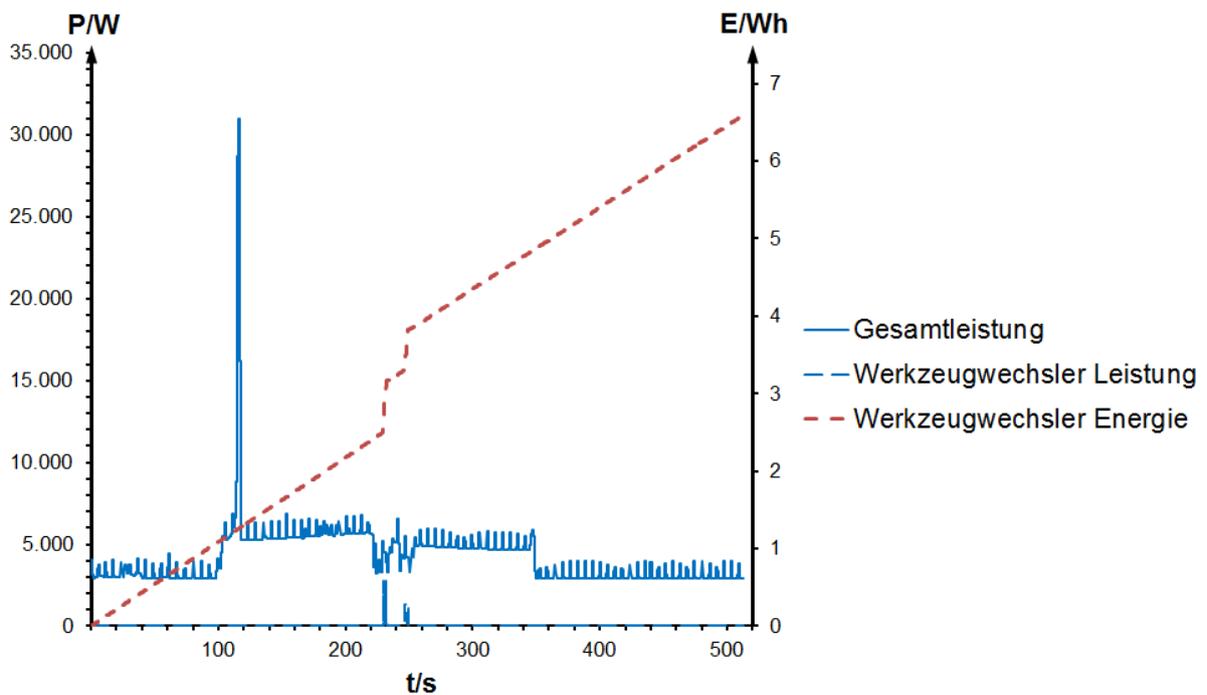
A33

Kühlaggregat Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



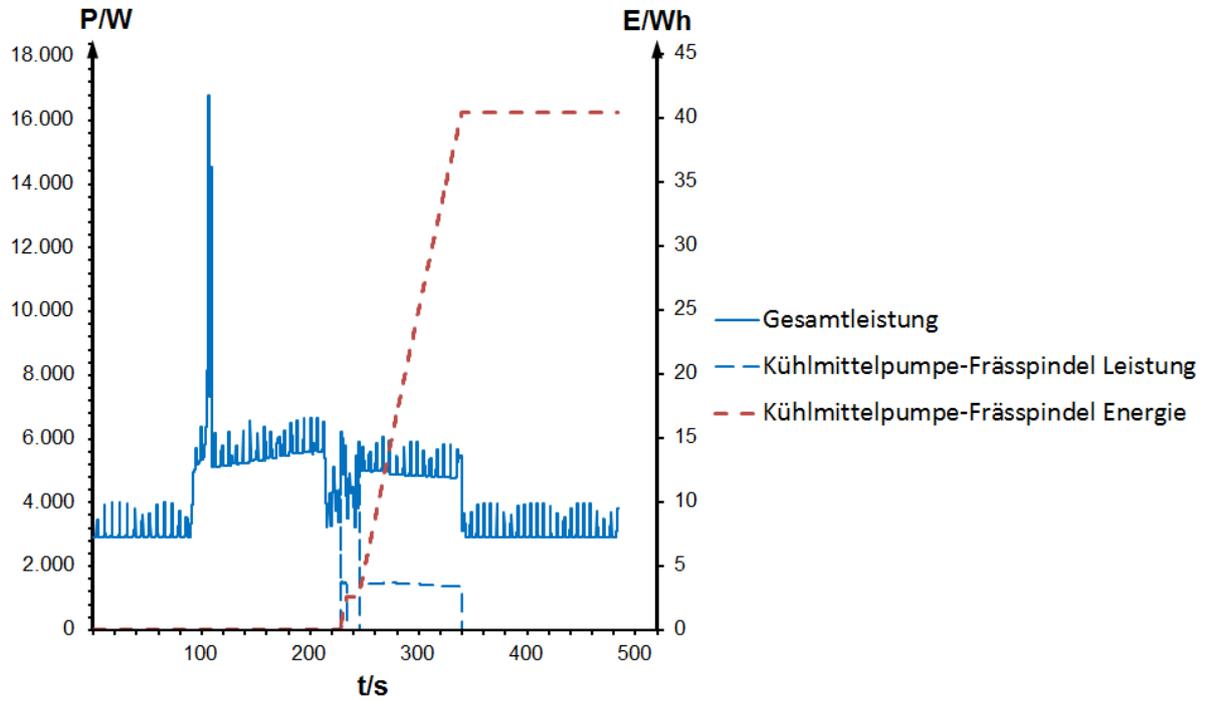
A34

Werkzeugwechsler Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



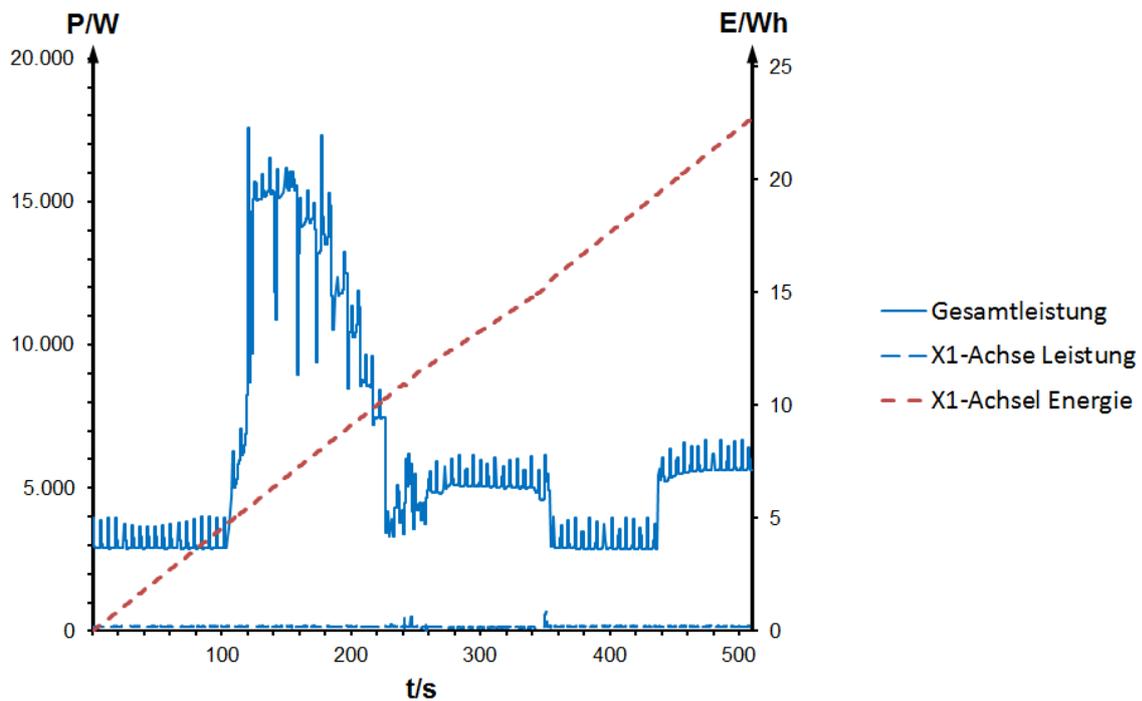
A35

Kühlmittelpumpe-Frässpindel Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



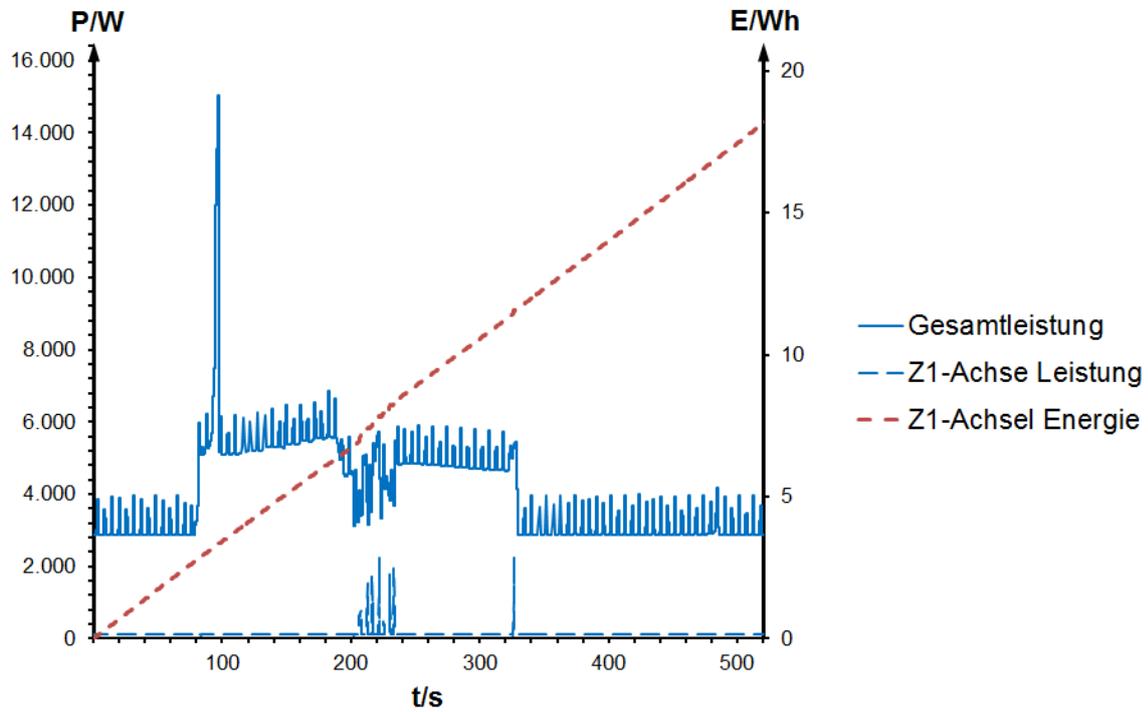
A36

X1-Achse Energieverlauf Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



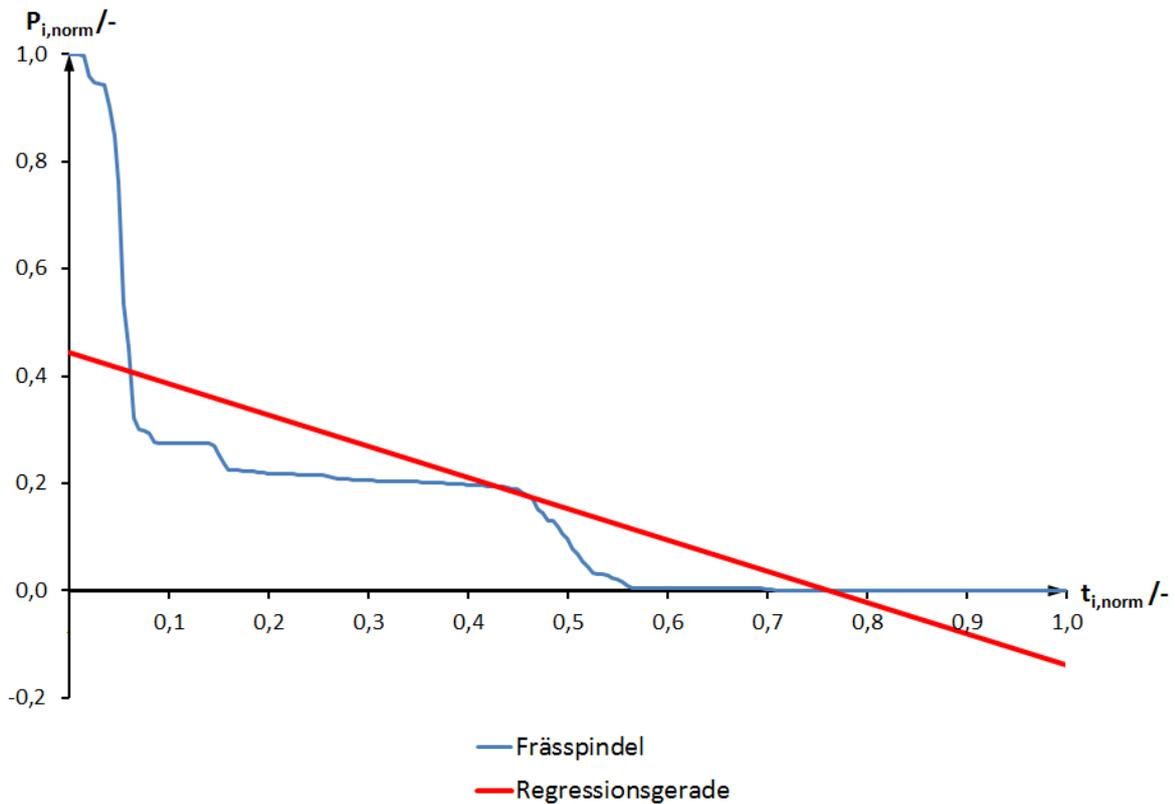
A37

Z1-Achse Energieverlauf Leistungs- und Energieverlauf der EMCO Hyperturn-655MCplus



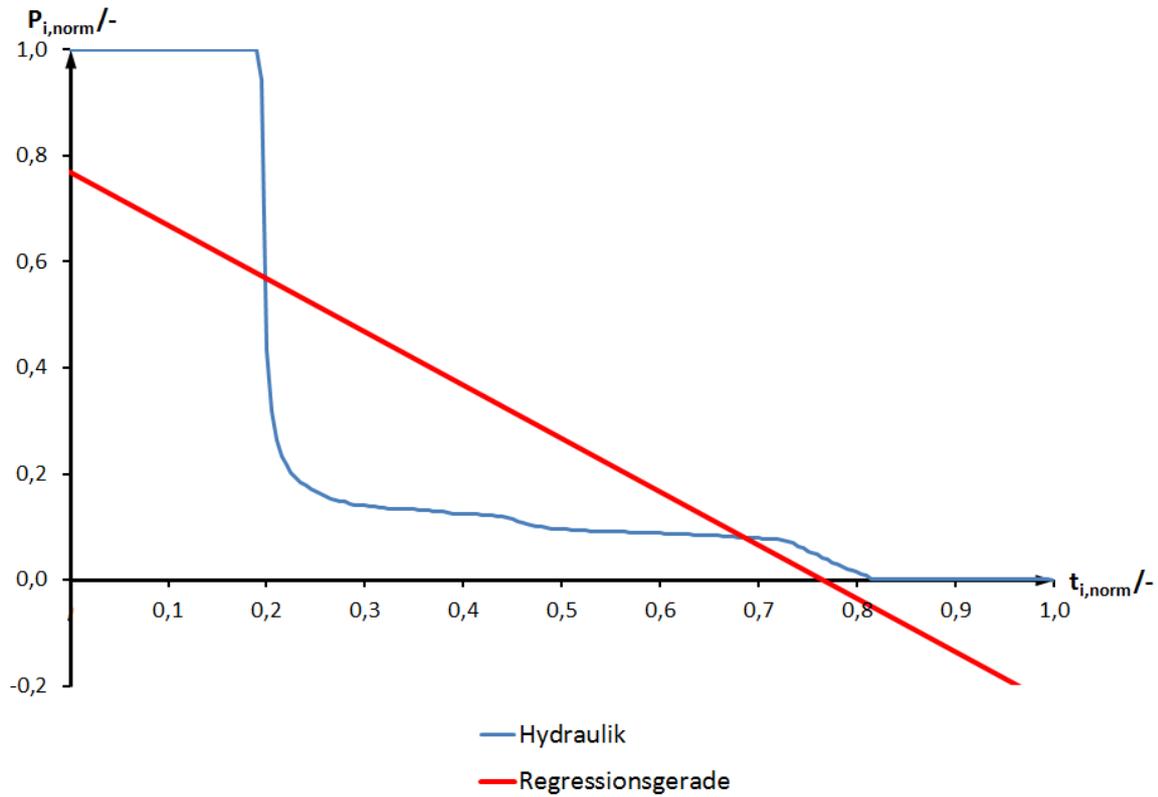
A38

Normierter Leistungsverlauf der Frässpindel



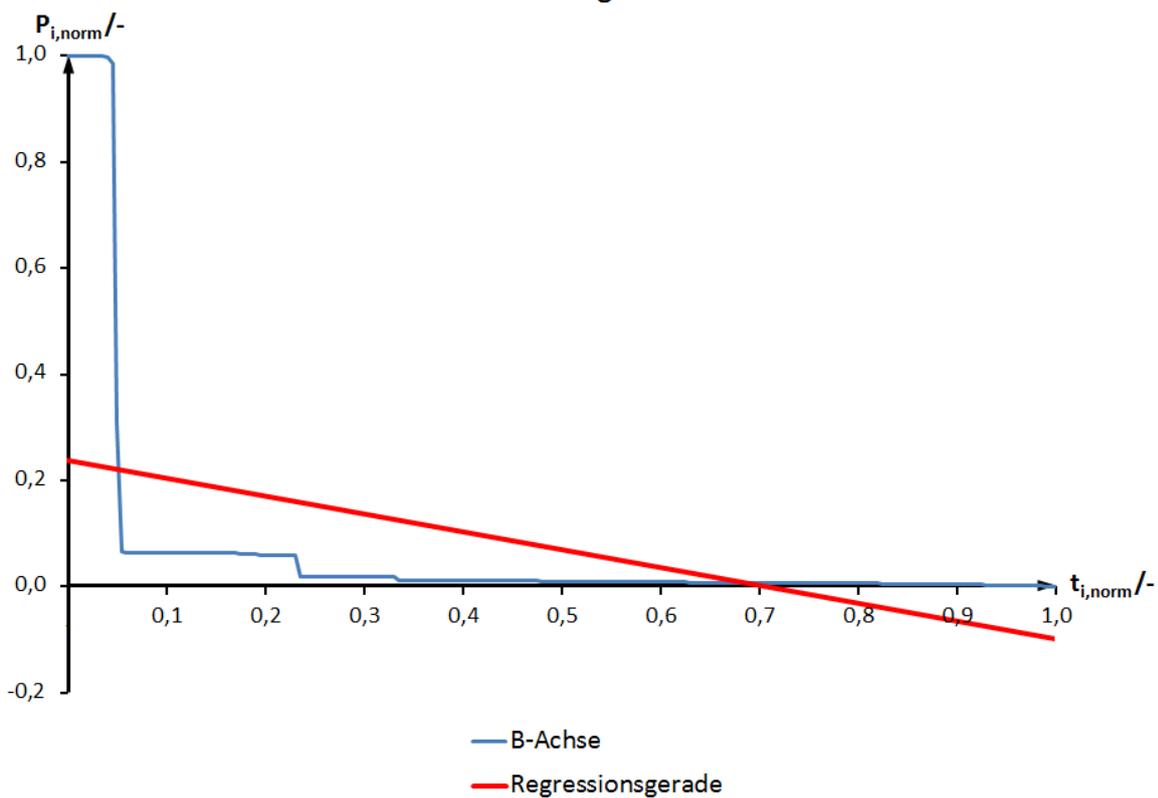
A39

Normierter Leistungsverlauf der Hydraulik



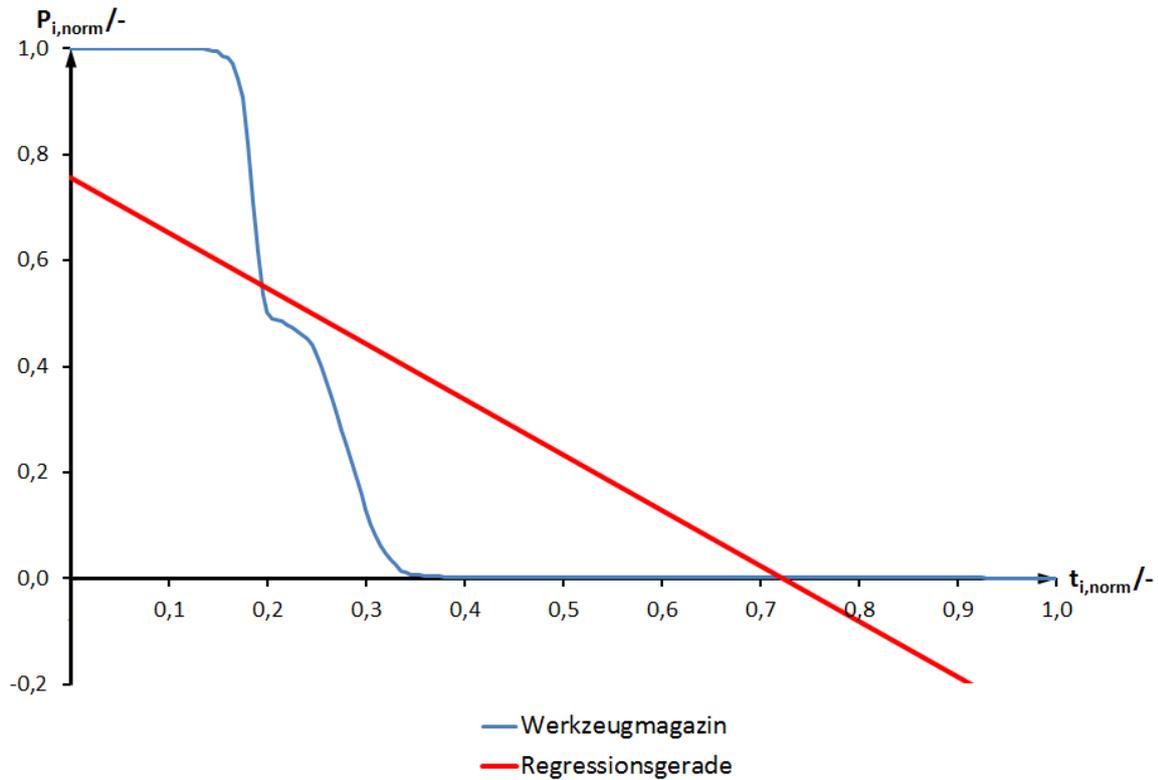
A40

Normierter Leistungsverlauf der B-Achse



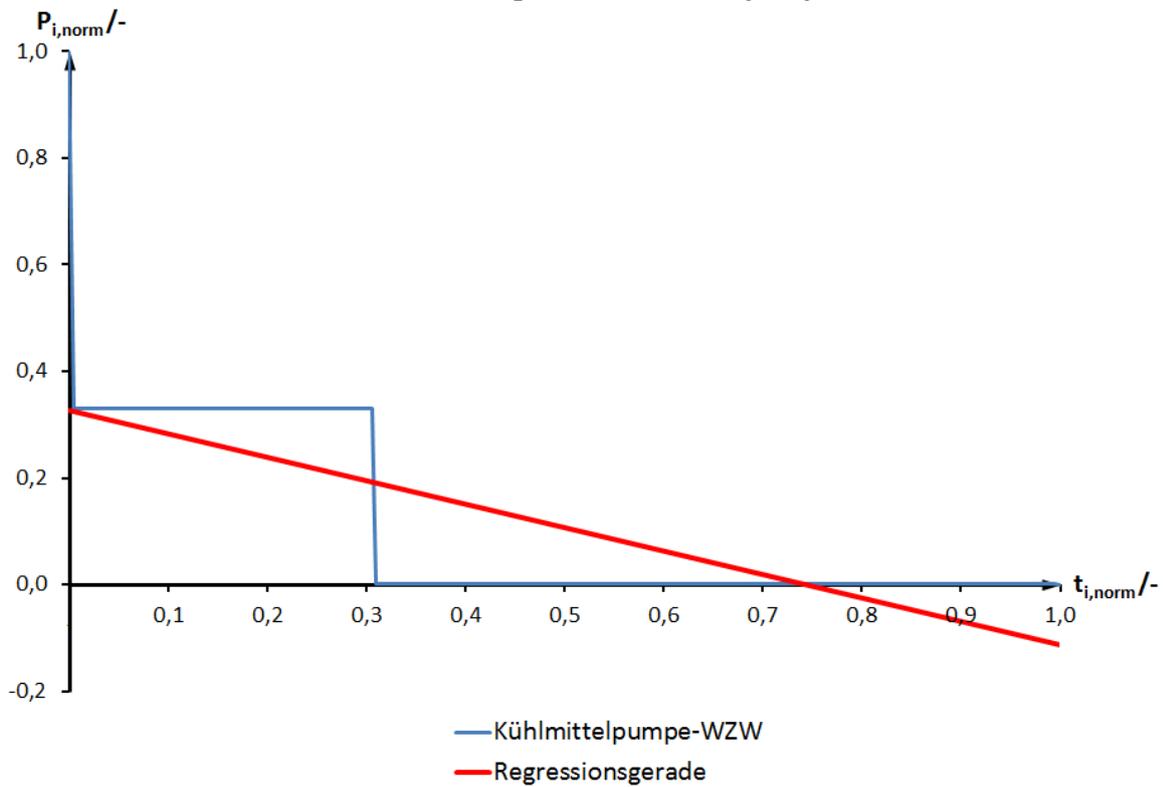
A41

Normierter Leistungsverlauf des Werkzeugmagazins



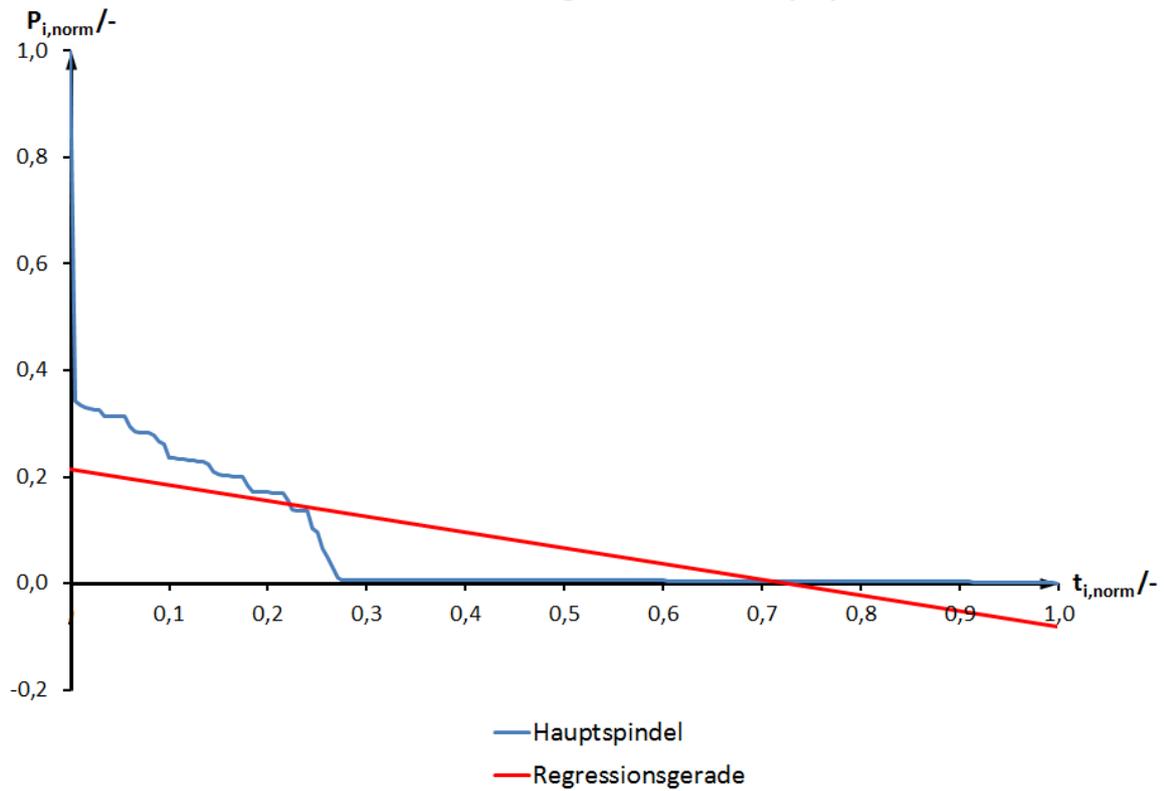
A42

Normierter Leistungsverlauf der Kühlpumpe-WZW



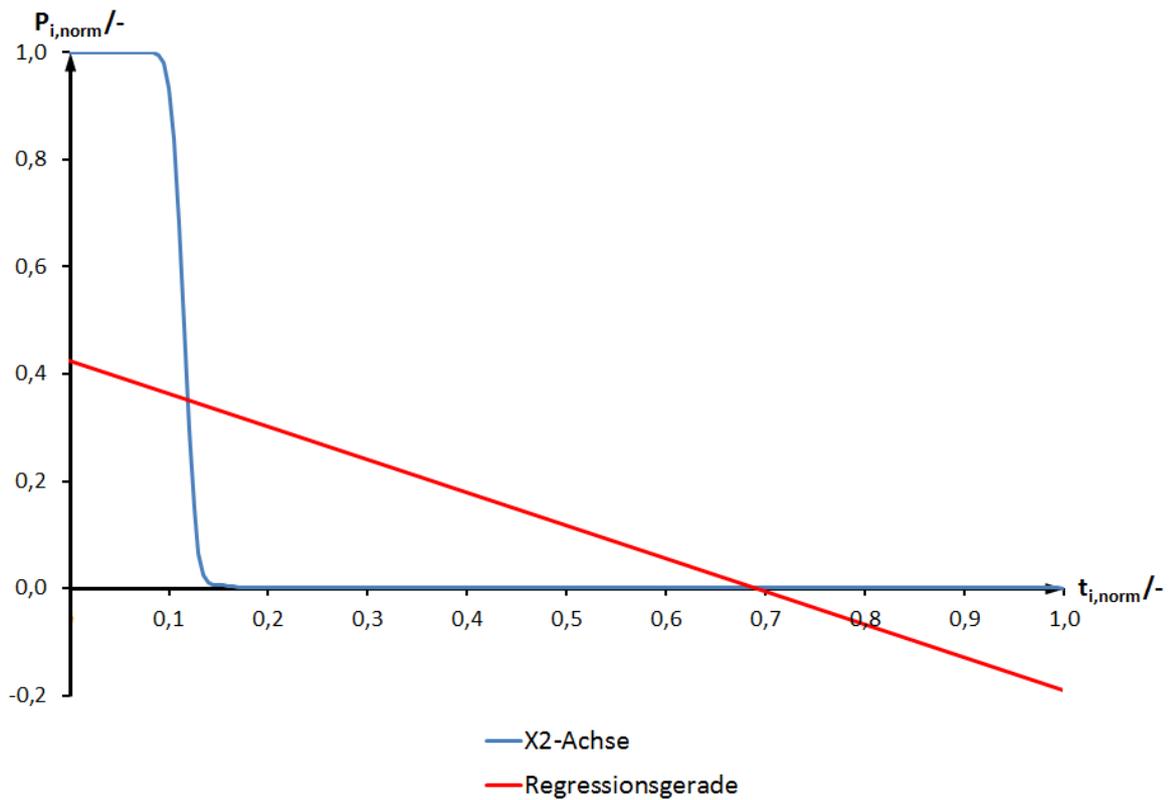
A43

Normierter Leistungsverlauf der Hauptspindel



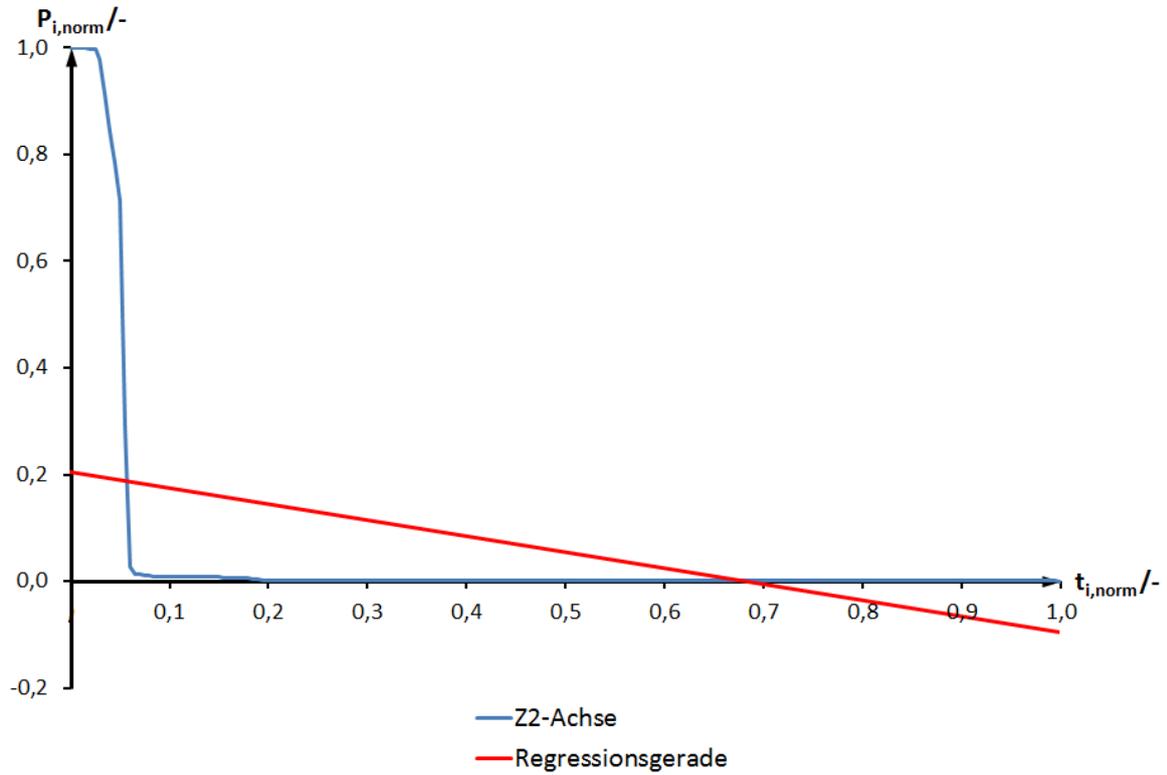
A44

Normierter Leistungsverlauf der X2-Achse



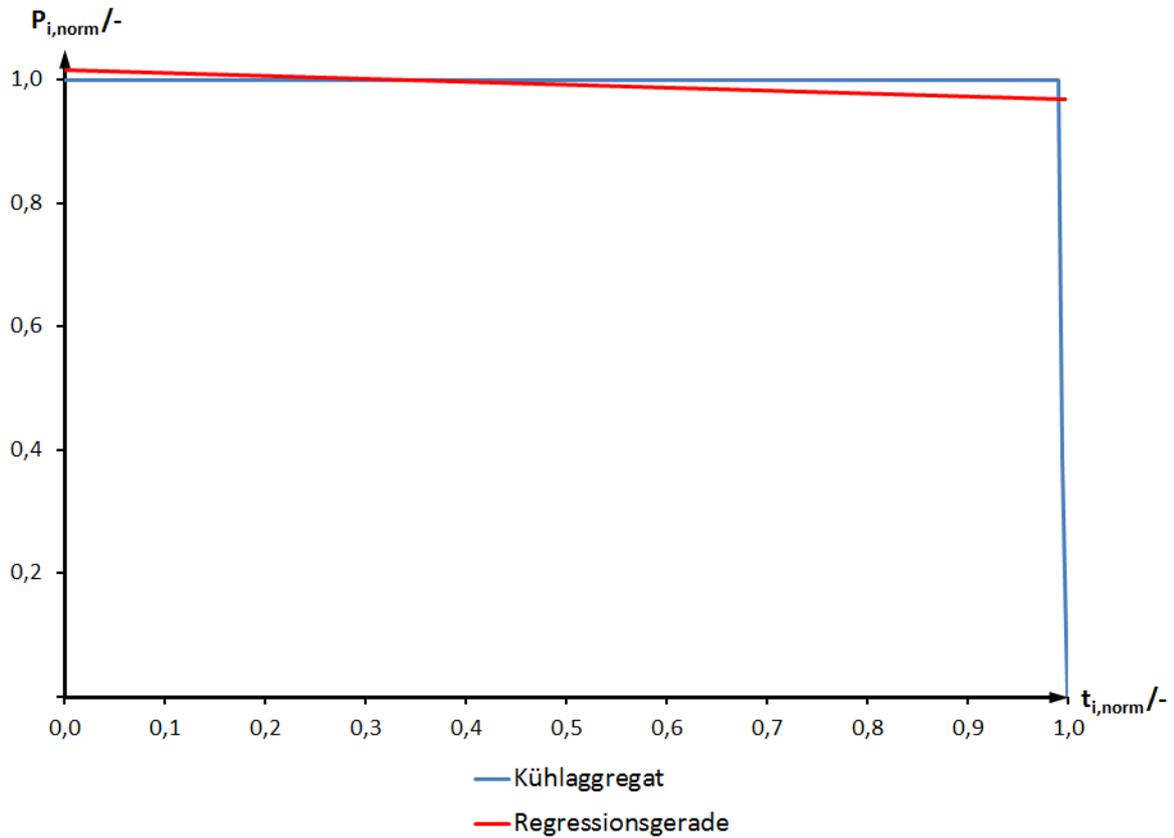
A45

Normierter Leistungsverlauf der Z2-Achse



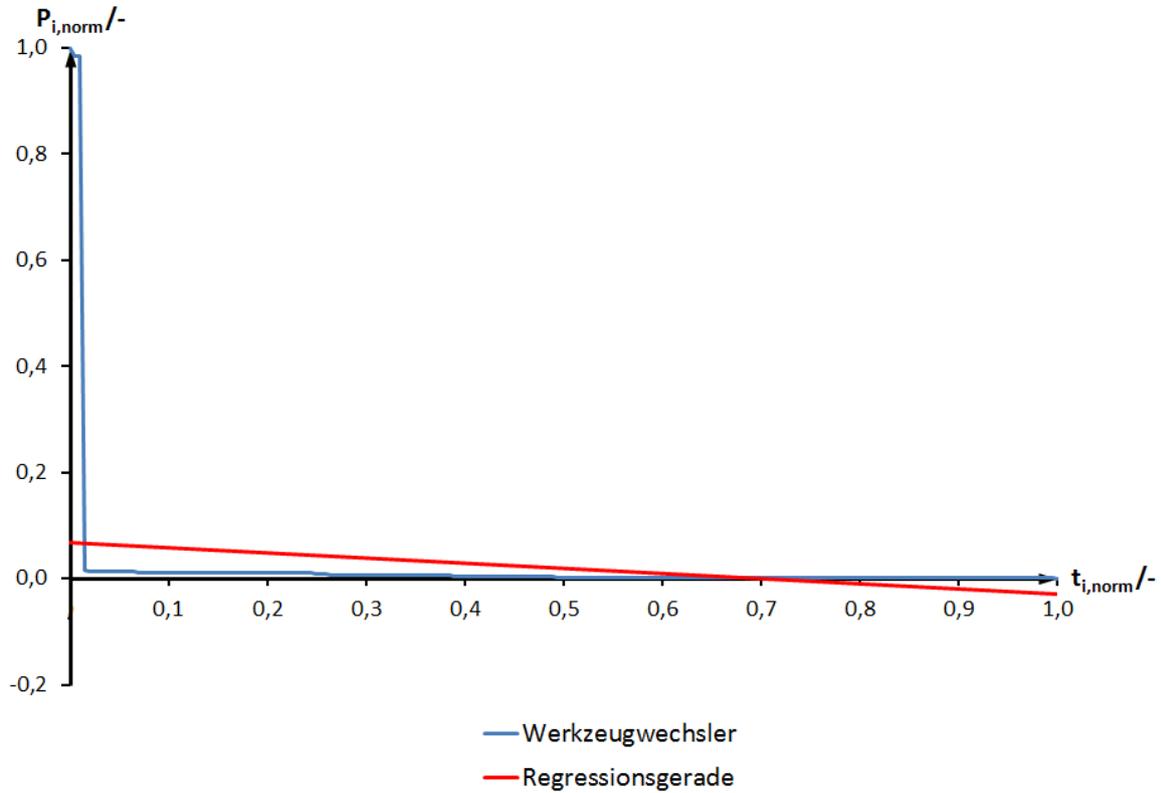
A46

Normierter Leistungsverlauf des Kühlaggregats



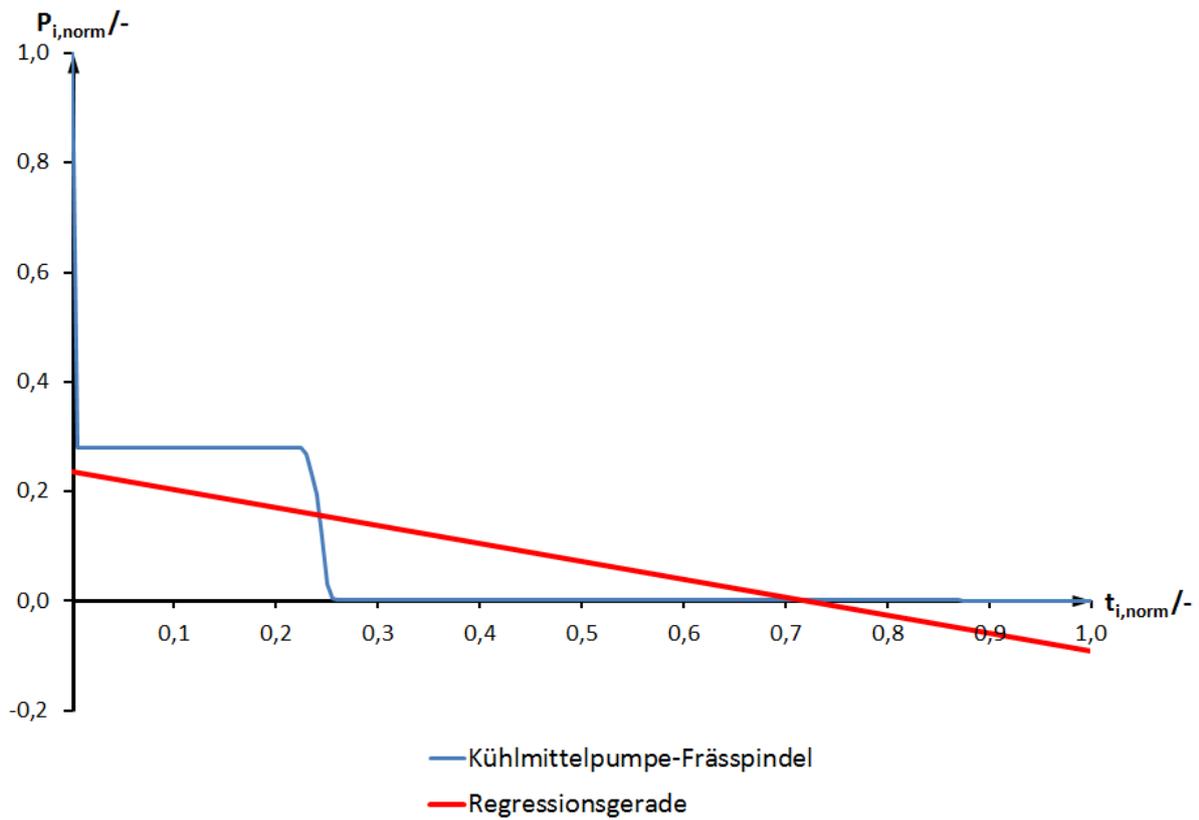
A47

Normierter Leistungsverlauf des Werkzeugwechslers



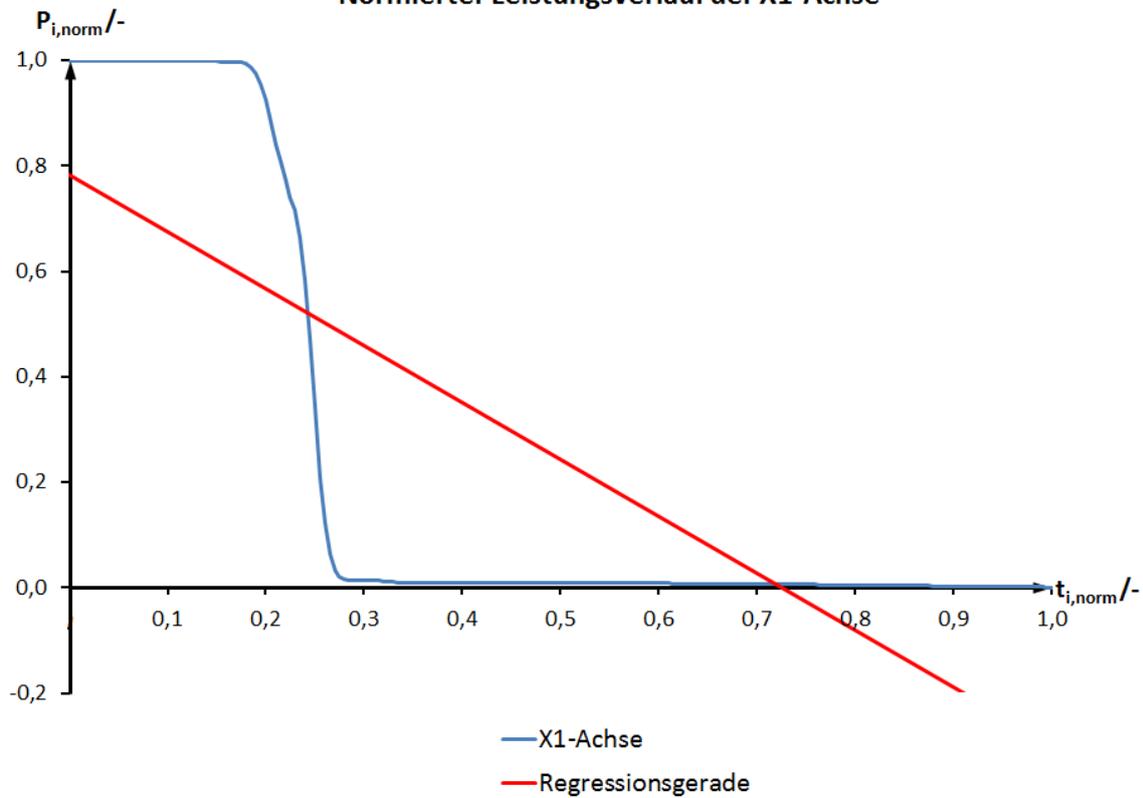
A48

Normierter Leistungsverlauf der Kühlmittelpumpe-Frässpindel



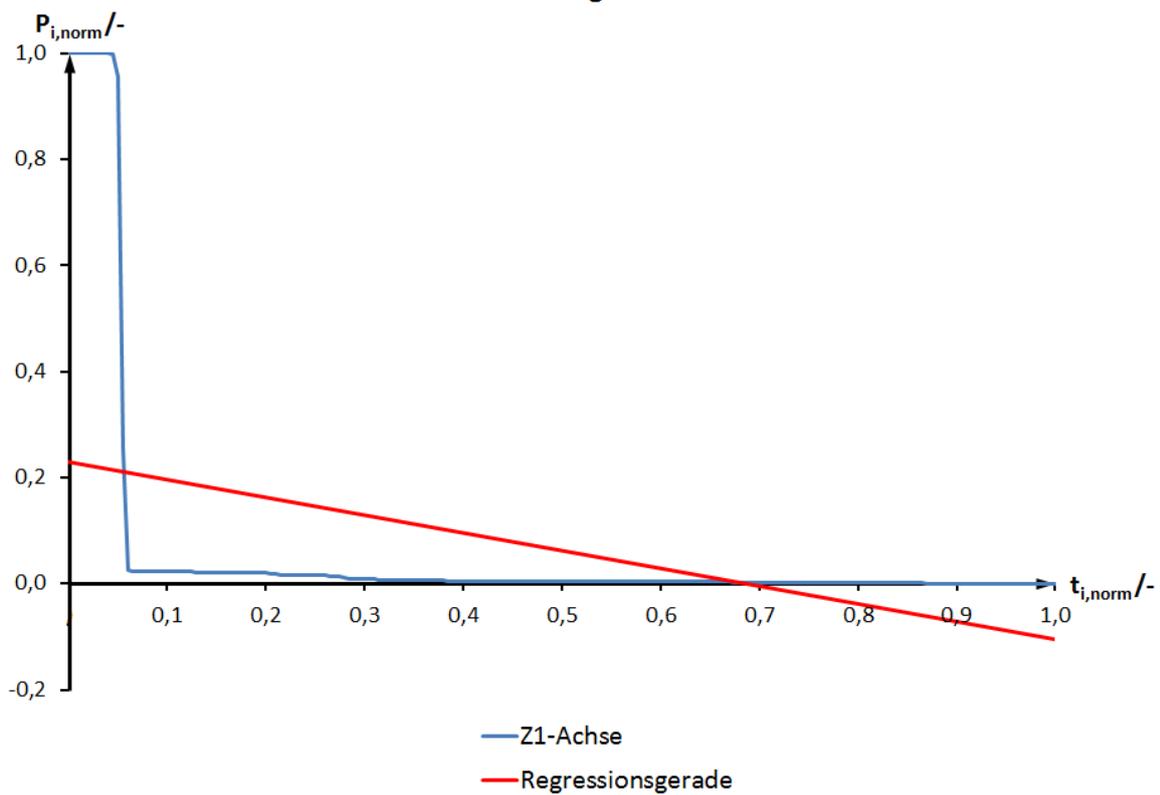
A49

Normierter Leistungsverlauf der X1-Achse



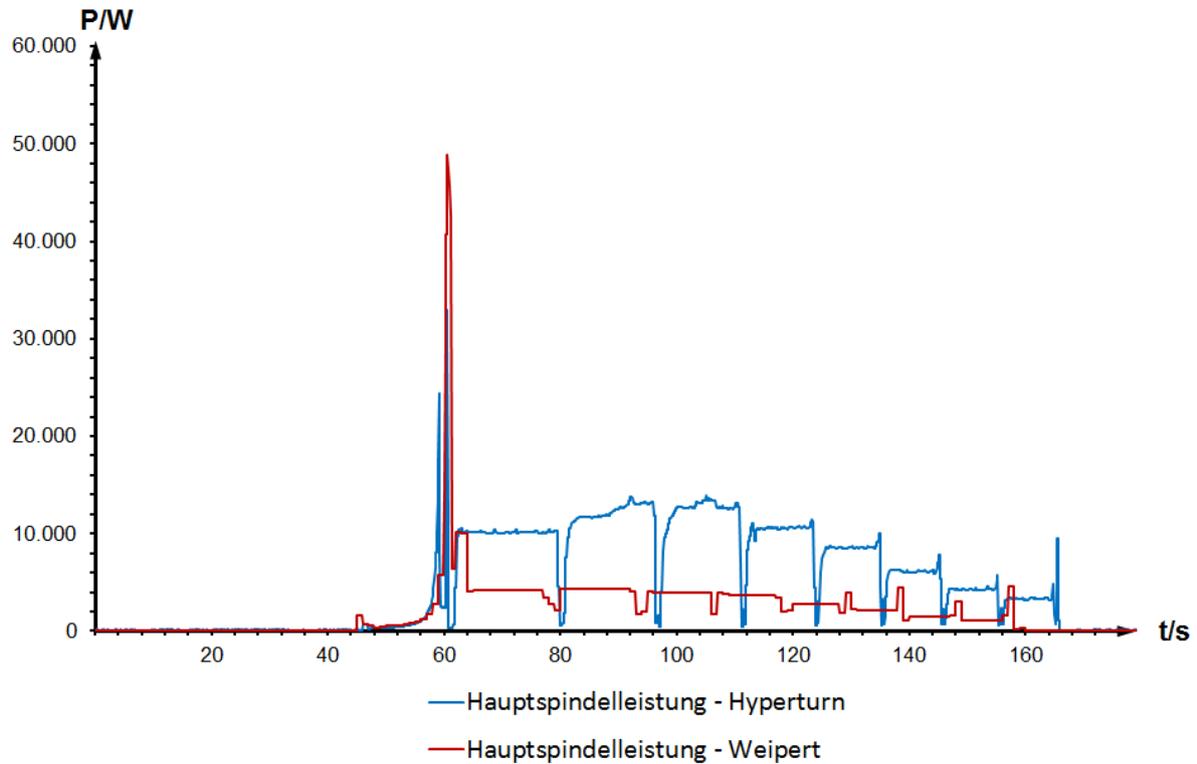
A50

Normierter Leistungsverlauf der Z1-Achse



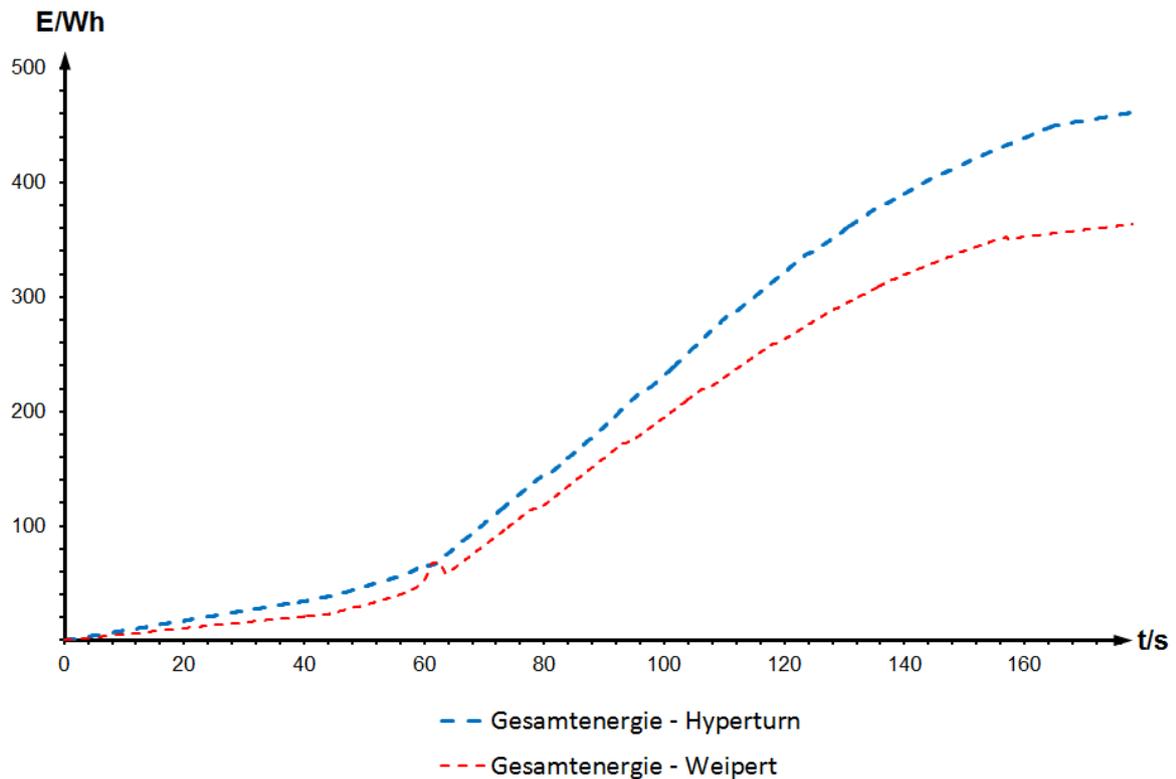
A51

Hauptspindelleistungsverläufe beider Werkzeugmaschinen



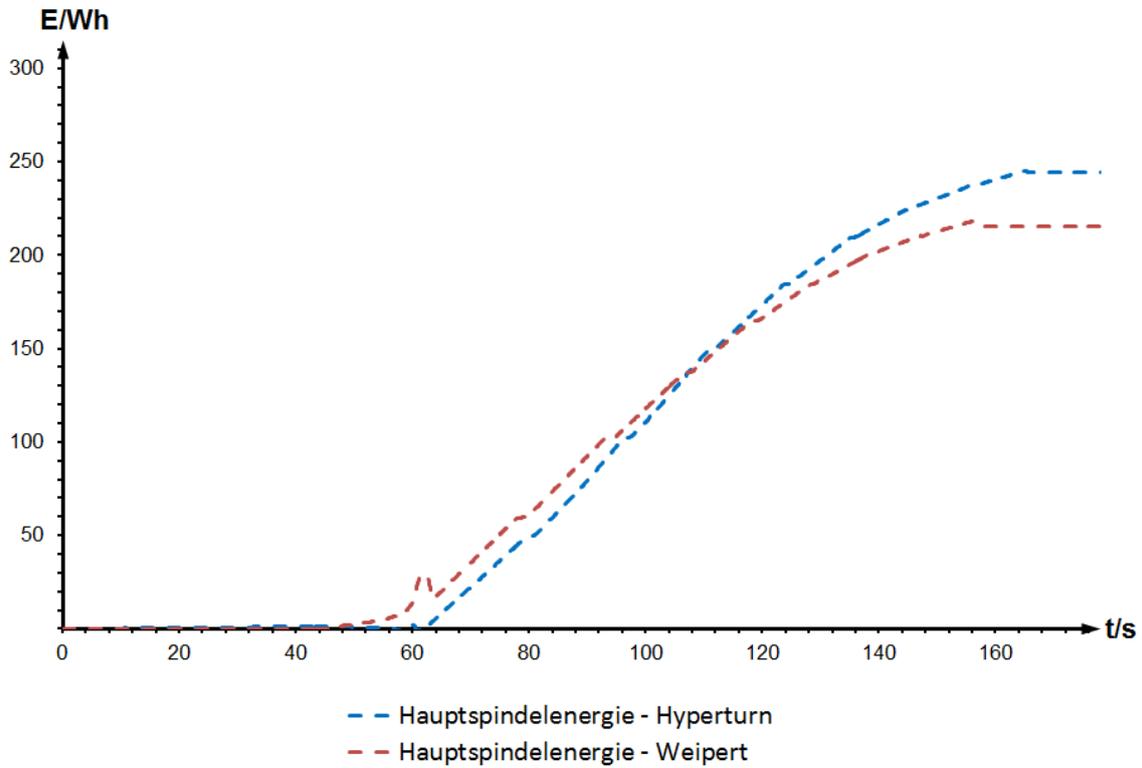
A52

Gesamtenergieverläufe beider Werkzeugmaschinen



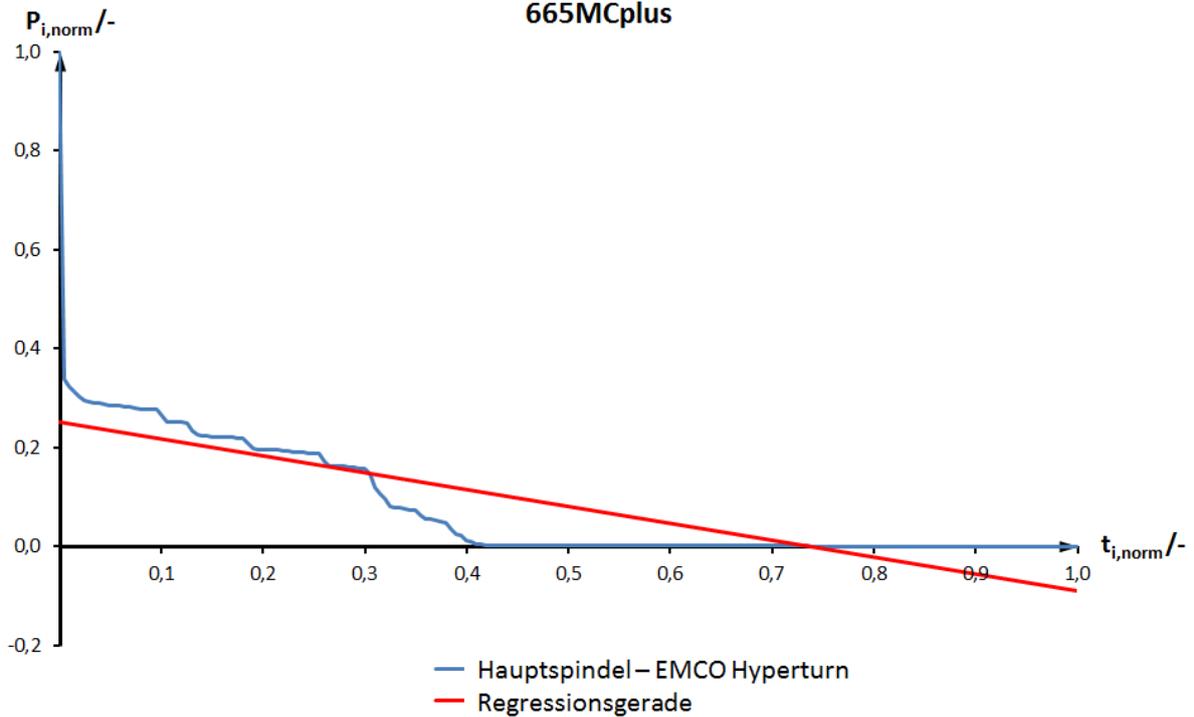
A53

Hauptspindelenergieverläufe beider Werkzeugmaschinen



A54

Normierter Leistungsverlauf der Hauptspindel - EMCO Hyperturn-665MCplus



A55

Normierter Leistungsverlauf der Hauptspindel - Voest Weipert WNC-500S

