



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Serkan Özdemir

Beurteilung der Energieeffizienz von CNC- Maschinen in der Zerspanung

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Serkan Özdemir

**Beurteilung der Energieeffizienz von
CNC-Maschinen in der Zerspanung**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer/in: Prof. Dr. Christian Müller
Zweitprüfer: Prof. Dr. Enno Stöver

Abgabedatum: 01.08.2023

Zusammenfassung

Serkan Özdemir

Thema der Bachelorthesis

Beurteilung der Energieeffizienz von CNC-Maschinen in der Zerspanung

Stichworte

- Stand der Technik „Zerspanende Werkzeugmaschinen unter dem Fokus Energieeffizienz“
- Bewertung einer ausgewählten CNC-Maschine entsprechend der ISO 14955-3
- Experimentelle Untersuchung zur Energieeffizienz an einer ausgewählten Maschine
- Ableitung eines Konzeptes für einen energieeffizienten Betrieb der Maschine in Form eines Maßnahmenkataloges (Aufwand/ Nutzen-Betrachtung)

Kurzzusammenfassung

Im Sinne der 17 von der UN proklamierten Klimaziele, aber auch den wirtschaftsraumbezogenen Zielsetzungen der EU und daraus abgeleiteten nationalen Klimazielen stellt sich neben den daraus resultierenden, vielfältigen Fragestellungen innerhalb der Energiewirtschaft in der Versorgung privater Haushalte und der Industrie, der Verkehrswirtschaft und Mobilität sowie der Verwendung von Konsumgütern die Frage, inwieweit Produktion innerhalb von Herstellprozessen Einfluss auf Energieverbräuche und Bedarfe Einfluss nimmt. Dies lässt sich in Betrachtungsebenen einzelner Maschinen in Produktionsbetrieben herunterbrechen. Die Frage stellt sich hier allerdings, inwieweit eine allgemeine, vergleichbare Bewertung einzelner Maschinen stattfinden kann und welche konkreten Kennwerte daraus für die Energieeffizienz von Maschinen abgeleitet werden können.

Die Norm ISO 14955-3:2020-07 beschreibt dabei, wie Werkzeugmaschinen einer umweltorientierten Bewertung unterzogen werden können, speziell im Teil 3 sind Grundsätze zum Test spanender Werkzeugmaschinen im Hinblick auf Energieeffizienz beschrieben.

Serkan Özdemir

Title of the paper

Assessment of the energy efficiency of CNC machines in metal cutting

Keywords

- State of the art "Machining machine tools with a focus on energy efficiency".
- Evaluation of a selected CNC machine in accordance with ISO 14955-3
- Experimental investigation of energy efficiency on a selected machine
- Derivation of a concept for energy-efficient operation of the machine in the form of a catalog of measures (cost/benefit analysis)

Abstract

In terms of the 17 climate goals proclaimed by the UN, but also the economic area-related goals of the EU and the national climate goals derived from them, the question arises, in addition to the resulting, diverse issues within the energy industry in the supply of private households and industry, the transport industry and mobility as well as the use of consumer goods, to what extent production within manufacturing processes influences energy consumption and demand. This can be broken down into observation levels of individual machines in production plants. The question arises here, however, as to what extent a general, comparable evaluation of individual machines can take place and what concrete characteristic values can be derived from this for the energy efficiency of machines.

The ISO 14955-3:2020-07 standard describes how machine tools can be subjected to an environmentally oriented assessment, and Part 3 describes the principles for testing metal-cutting machine tools with regard to energy efficiency.

Aufgabenstellung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences
Department Maschinenbau und Produktion

Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von: Herrn Serkan Özdemir

Matrikel-Nummer.: 

Thema: Beurteilung der Energieeffizienz von CNC-Maschinen in der Zerspanung

Im Sinne der 17 von der UN proklamierten Klimaziele, aber auch den wirtschaftsraumbezogenen Zielsetzungen der EU und daraus abgeleiteten nationalen Klimazielen stellt sich neben den daraus resultierenden, vielfältigen Fragestellungen innerhalb der Energiewirtschaft in der Versorgung privater Haushalte und der Industrie, der Verkehrswirtschaft und Mobilität sowie der Verwendung von Konsumgütern die Frage, inwieweit Produktion innerhalb von Herstellprozessen Einfluss auf Energieverbräuche und Bedarfe Einfluss nimmt. Dies lässt sich in Betrachtungsebenen einzelner Maschinen in Produktionsbetrieben herunterbrechen. Die Frage stellt sich hier allerdings, inwieweit eine allgemeine, vergleichbare Bewertung einzelner Maschinen stattfinden kann und welche konkreten Kennwerte daraus für die Energieeffizienz von Maschinen abgeleitet werden können.

Die Norm ISO 14955-3:2020-07 beschreibt dabei, wie Werkzeugmaschinen einer umweltorientierten Bewertung unterzogen werden können, speziell im Teil 3 sind Grundsätze zum Test spanender Werkzeugmaschinen im Hinblick auf Energieeffizienz beschrieben.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit soll eine Werkzeugmaschine an der HAW auf ihren Energieverbrauch untersucht, hinsichtlich der Energieeffizienz unter Zugrundelegung der beschriebenen Norm bewertet werden. Darüber sollen mögliche Maßnahmen definiert werden, um diese Maschine energieeffizienter zu betreiben. Als Basis dienen bereits am Institut durchgeführte Arbeiten an Umformmaschinen.

Schwerpunkte:

- Beschreiben des Standes der Technik zerspanender Werkzeugmaschinen und deren Aufbaukomponenten unter dem Fokus Energieeffizienz
- Ausarbeiten der Vorgehensweise zur Bewertung einer ausgewählten CNC-Maschine in der Zerspanung entsprechend ISO 14955-3
- Experimentelle Untersuchung zur Energieeffizienz am Beispiel einer ausgewählten Maschine, energieführender Aufbaukomponenten
- Ableitung eines Konzeptes für einen energieeffizienten Betrieb der Maschine in der Form eines Maßnahmenkatalogs (mit Aufwand/Nutzen-Betrachtung)

03.05.2023

Datum


Erstprüfer

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung	I
Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Formelzeichenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung/ Motivation.....	1
2 Stand der Wissenschaft im Fokus der Energieeffizienz.....	2
2.1 Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen.....	2
2.2 Grundlegender Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine	2
2.3 Energetische Betrachtung der einzelnen Aggregate.....	4
2.3.1 Hauptspindel	5
2.3.2 Kühlschmierstoffsysteme.....	7
2.3.3 Kühlsystem.....	11
2.3.4 Vorschubantrieb	15
2.3.5 Hydraulikaggregate	17
2.3.6 Weitere Hilfsaggregate.....	19
3 Vorgehensweise der ISO 14955-3	21
3.1 Einleitung in die ISO 14955-3.....	21
3.2 Aufbau der ISO 14955-3	21
3.2.1 Umfang der Norm.....	21
3.2.2 Normative Referenzen	22
3.2.3 Begriffe und Definitionen.....	22

3.2.4	Allgemeiner Ansatz für die Umweltbewertung von Werkzeugmaschinen.....	22
3.2.5	Durchschnittliche Leistung der Werkzeugmaschine.....	25
3.2.6	Referenzszenario der Werkzeugmaschine	27
3.2.7	Auswertung	28
3.3	Kritische Bewertung der Norm 14955-3	29
4	Anwendung der ISO 14955-3 an der EMCOTURN 365MC	30
4.1	Aufbau des Drehbearbeitungszeitung EMCOTURN 365MC	30
4.2	Allgemeine Informationen.....	30
4.3	Messgerät.....	31
4.4	Messungen der Betriebszustände.....	32
4.4.1	Berechnung der elektrischen Leistung.....	32
4.4.2	Ergebnisse der Messungen	33
4.5	Auswertung	39
4.6	Fazit	41
5	Maßnahmenkatalog.....	42
6	Zusammenfassung	48
7	Ausblick.....	48
8	Literaturverzeichnis.....	50
9	Erklärung zu selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit.....	53

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine ([1], S. 646)	3
Abbildung 2: Energieverbrauchsaufteilung einer Werkzeugmaschine ([4], S. 6)	4
Abbildung 3: Wirkungsgraddiagramm eines beispielhaften 25kW Spindelinduktionsmotors ([2], S.652)	6
Abbildung 4: Übersicht der eingesetzten Düsen ([10], S. 567).....	8
Abbildung 5: Nutzbarer Schneidstoffdurchsatzes in Abhängigkeit vom Düsensdesign ([10], S. 568)	10
Abbildung 6: Heißgas-Bypassventil System ([7], S.15).....	12
Abbildung 7: Vergleich zwischen einem herkömmlichen und einem Inverter Kompressor [8]	14
Abbildung 8: Aufbau und Funktionsweise von einem Scroll Kompressor ([2] S. 656)	15
Abbildung 9: Grundlegende Konstruktionskonzepte für Hydraulikaggregate in Werkzeugmaschinen [22]	17
Abbildung 10: Scharnierbandförderer mit Kühlmittelbehälter ([10], S.607)	20
Abbildung 11: Allgemeiner Ansatz für die Umweltbewertung.....	25
Abbildung 12: Standardzeitanteil der Betriebszustände	26
Abbildung 13: geschätzte Energie E pro Jahr auf der Grundlage des individuellen Zeitanteils der Betriebsdaten.....	28
Abbildung 14: Fluke Multimeter Modell 376 FC [18]	31
Abbildung 15: Energieverbrauch im Betriebszustand off.....	33
Abbildung 16: Energieverbrauch im Betriebszustand OFF to ON	34

Abbildung 17: Energieverbrauch im Betriebszustand Standby	35
Abbildung 18: Energieverbrauch im Betriebszustand Kurz vor Prozess.....	36
Abbildung 19: Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess (Luftschnitt)	37
Abbildung 20: Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess	38
Abbildung 21: Maschinenspezifische Abschaltstrategie ([29], S.70)	44
Abbildung 22: Maschinenspezifische Abschaltstrategie ([29], S.71–72).....	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Allgemeine Information im Überblick.....	30
Tabelle 2: Allgemeine technische Angaben Fluke 376 FC Messgerät [28]	31
Tabelle 3: Messung der Leistung im Zustand ausgeschaltet	33
Tabelle 4: Messung der Leistung Im Betriebszustand OFF to ON	34
Tabelle 5: Messung der Leistung im Zustand Standby	35
Tabelle 6: Messung der Leistung im Zustand Ready	36
Tabelle 7: Messung der Leistung im Zustand Luftschnitt (Prozess).....	37
Tabelle 8: Messung der Leistung im Zustand Prozess	38
Tabelle 9: Zusammenfassung der Messwerte	39
Tabelle 10: geschätze Energie E pro Jahr auf der Grundlage des individuellen Zeitanteils der Betriebsdaten	40

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
E	Energieaufwand	[kJ]
E_{KSS}	Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung	[kJ]
P_{pumpe}	Leistung der Pumpe	[kW]
P_{KSS}	Pumpendruck	[pa]
I	Stromstärke	[A]
P	Leistung	[W]
Q	Elektrische Ladung	[As]
t	Zeit	[t]
U	Spannung	[V]
η_{Pumpe}	Wirkungsgrad der Pumpe	[-]
φ	Phasenverschiebung	[°]
ρ_{KSS}	Dichte vom Kühlschmierstoff	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	ggf. deutsche Bezeichnung
EnPi	Energieleistungskennzahlen	
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen
KSS	Kühlschmierstoff	
PWM	Pulsweitenmodulation	
WZM	Werkzeugmaschinen	

1 Einleitung/ Motivation

Steigende Energiepreise und die europäischen Klimaschutzziele stellen für Unternehmen eine enorme Herausforderung dar. Es ist unvermeidlich, dass sich die Industrie mit dem Thema Nachhaltigkeit auseinandersetzt. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe erzeugt Treibhausgase, die den Klimawandel beschleunigen. Daher ist ein bewusster Umgang mit Ressourcen unerlässlich. Energieeinsparung in der Industrie hat nicht nur den Vorteil für das Klima, sondern auch für die Betriebskosten. Gegenwärtig steigen die Preise für Strom sowie fossile Brennstoffe wie Gas und Erdöl rapide an. [1]

Die Stromerzeugung weltweit basiert hauptsächlich auf fossilen Brennstoffen, was für etwa 25 % der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Das IPCC hat festgestellt, dass die CO₂-Emissionen bis 2030 um etwa 25 % reduziert werden müssen und bis 2070 netto null erreichen müssen, um das Klimaziel von 2 °C zu erreichen. Jedoch steht diesem Ziel und der drohenden Verknappung der nicht erneuerbaren Ressourcen für die Energieerzeugung ein scheinbar unstillbarer Energiebedarf und niedrige Energiepreise gegenüber. In den letzten 30 Jahren hat sich der globale Energiebedarf aufgrund der Globalisierung, einer wachsenden Bevölkerung und einer expandierenden Industrie nahezu verdoppelt. Im Jahr 2018 hatte die Industrie einen Anteil von 38 % am weltweiten Energiebedarf, und Schätzungen zeigen, dass 5 bis 10 % dieses Anteils auf den Energiebedarf von Werkzeugmaschinen entfallen. Besonders die spanenden Werkzeugmaschinen machen 70 bis 80 % des deutschen Werkzeugmaschinenmarkts aus und tragen damit 1 bis 3 % oder 200 bis 700 TWh zum weltweiten Energiebedarf bei, mit steigender Tendenz. Dies entspricht im Durchschnitt dem gesamten elektrischen Energiebedarf in Deutschland im Jahr 2016. Da Werkzeugmaschinen oft große Energieverluste aufweisen, sind sie ein sinnvoller Ansatzpunkt für Energieeffizienzmaßnahmen in der produzierenden Industrie, auch wenn sie lange Amortisationszeiten und hohe Umsetzungskosten mit sich bringen. ([2], S. 646)

2 Stand der Wissenschaft im Fokus der Energieeffizienz

2.1 Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen

Die Maßnahme zur Energieeinsparung in der Industrie sind in zwei Ansätze unterteilt: Der erste Ansatz beinhaltet die technologische Optimierung der Haupt- und Nebenaggregate von Werkzeugmaschinen, um ihren Energiebedarf zu reduzieren. Der zweite Ansatz umfasst die betriebliche Effizienzmaßnahme, wie die Anpassung der Prozessparameter, sowie die bedarfsgerechte Versorgung mit Medien und Energie. ([2], S. 647)

Die Norm ISO 14955-1 für die Umweltbewertung von Werkzeugmaschinen definiert Energieeffizienz als das „Verhältnis oder eine andere quantitative Beziehung zwischen einem Output an Leistung, Dienstleistung, Waren oder Energie und einem Input an Energie“. [3]

2.2 Grundlegender Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine

In diesem Abschnitt wird zunächst eine kurze Einführung in den grundlegenden Aufbau von spanenden Werkzeugmaschinen gegeben, gefolgt von einer detaillierten energetischen Analyse der einzelnen Aggregate.

Eine detaillierte Analyse der Energieeffizienz jeder einzelnen Werkzeugmaschine wäre im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht möglich. Zudem unterschieden sich die einzelnen Haupt- und Nebenaggregate bei unterschiedlicher Werkzeugmaschinenkonfiguration nicht grundlegend voneinander. ([2], S. 646)

In der (Abb. 1) wird ein typischer Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine dargestellt.

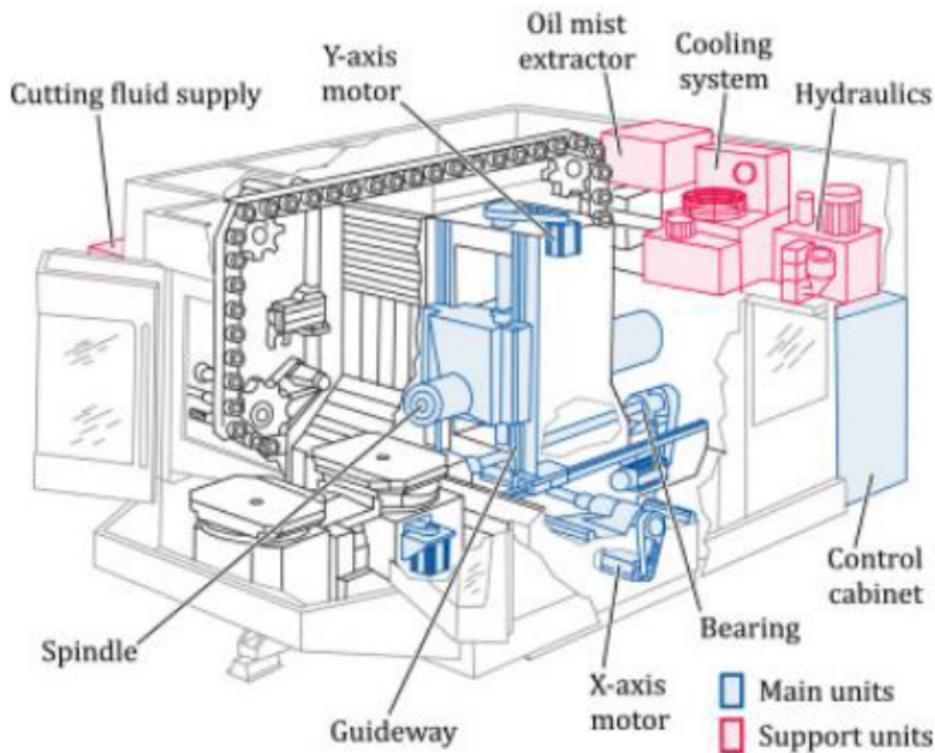


Abbildung 1: Aufbau einer spanenden Werkzeugmaschine ([1], S. 646)

Wie in der (Abb. 1) zu sehen ist, zählt das Maschinengestell sowie die Dreh- und Vorschubachse zu den Hauptaggregaten der Werkzeugmaschine. Die Maschinenachse setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, darunter Antriebe wie Motoren und Umrichter, sowie Führungen und Lager. Die Antriebskomponenten spielen eine wesentliche Rolle bei der Leistungsfähigkeit der Maschinenachse. Die Motoren wandeln die elektrische Energie in mechanische Energie um, die dann zu einer Bewegung der Spindel führt. Der Umrichter hilft dabei, die Geschwindigkeit und Richtung der Achsen zu steuern. Die Aufgabe von Lagerungen und Führungen besteht darin, eine präzise und zuverlässige Bewegung der Bauteile zu ermöglichen. Auch werden in der Regel die Drehtische, Schlitten oder andere Hilfssysteme, wie z. B. Werkzeug- oder Palettenwechsler von den Antriebskomponenten angetrieben. Der Steuer-schrank gehört auch zu den Hauptkomponenten, welcher die Aufgabe hat, den gesamten Fertigungs- und Überwachungsprozess zu steuern. Die Nebenaggregate haben die Aufgabe, die Werkzeugmaschine mit verschiedenen Medien wie z. B. Luft oder

Kühlschmierstoff zu versorgen. Dabei werden Kühlungssysteme, Kühlschmierstoffsystem als auch hydraulische- und pneumatische Systeme genutzt. Darüber hinaus umfassen die Nebenaggregate auch weitere Teilsysteme zur Rezirkulation und Aufbereitung der eingebrachten Hilfsstoffe, nämlich Rückziehpumpen, Späneförderer, Filtersysteme und Wärmetauscher. ([2], S. 647–648)

2.3 Energetische Betrachtung der einzelnen Aggregate

Im nachfolgenden wird der Gesamtenergieverbrauch einer Werkzeugmaschine gezeigt und darauffolgend die verschiedenen Systeme einzeln untersucht.

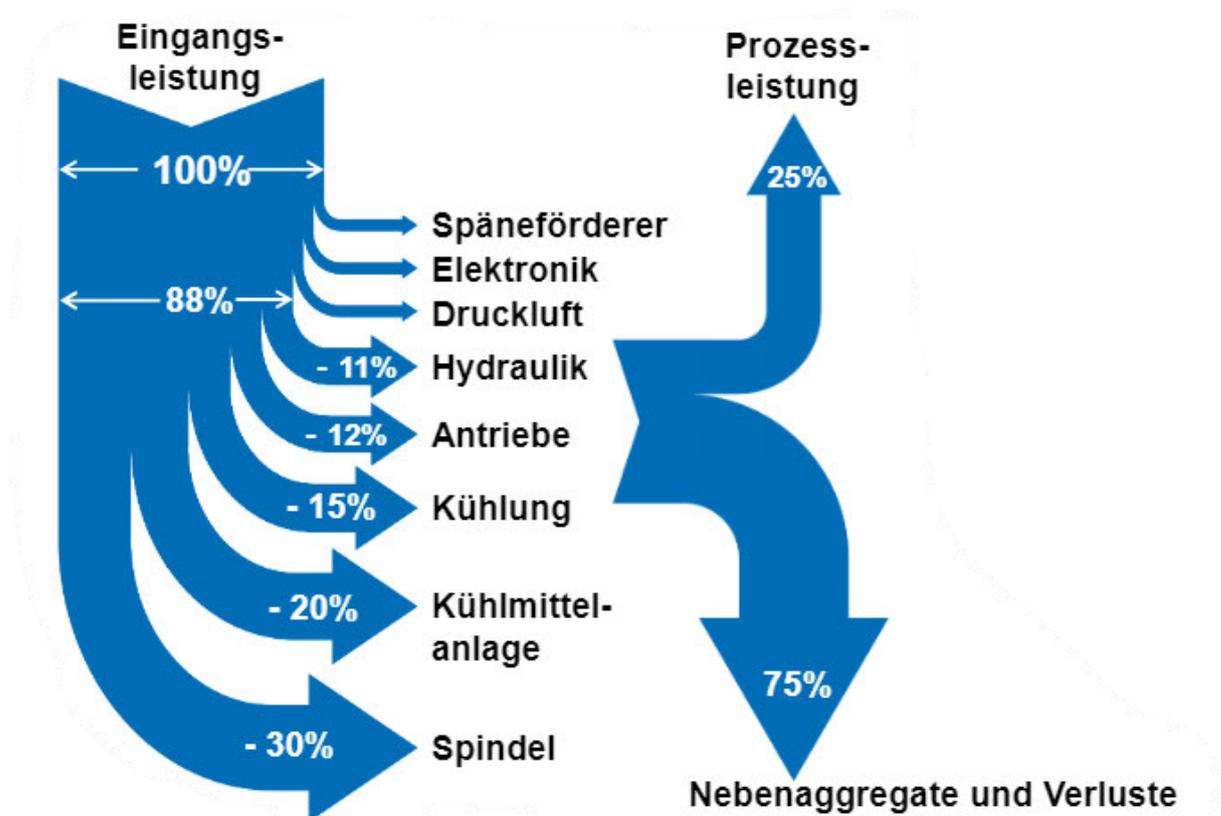


Abbildung 2: Energieverbrauchsaufteilung einer Werkzeugmaschine ([4], S. 6)

Das Sankey-Diagramm (Abb. 2) zeigt eine typische Energieverbrauchsaufteilung einer Werkzeugmaschine. Das Diagramm zeigt auf, dass die Spindel mit 30 % den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch ausmacht. An zweiter Stelle steht die Kühlmittelanlage mit einem Anteil von 20 %. Die Kühlung mit einem Anteil von 15 %. Etwa ein Drittel des Energiebedarfs verteilt sich auf die Hydraulik, Antriebe und andere

Systeme wie beispielsweise Druckluft, Elektronik und Späneförderer. Die Prozessleistung macht mit 25 % nur einen kleinen Anteil am Gesamtenergieverbrauch aus. Nebenaggregate mit 75 % sind dagegen die großen Energiefresser. ([4], S. 6)

2.3.1 Hauptspindel

Die Hauptspindel hat eine bedeutende Rolle im Zerspanungsprozess, da sie sowohl Werkzeuge als auch Werkstücke antreiben und dadurch einen maßgeblichen Einfluss auf die Wertschöpfung ausüben. Es gibt verschiedene Ausführungsvarianten von Hauptspindelantrieben, darunter integrierte Motorspindeln, indirekt angetriebene Spindeln und Hybridspindeln. Aufgrund ihrer hohen Steifigkeit werden in der Regel integrierte Motorspindeln bevorzugt eingesetzt. Integrierte Motorspindeln zeichnen sich dadurch aus, dass der Motor direkt am Werkzeugspanner angebracht ist. Im Vergleich zu indirekt angetriebenen Spindeln entfallen dabei Zahnräder oder Riemenantriebe. Allerdings resultiert dies in einem erhöhten Kühlbedarf, insbesondere bei Anwendungen mit einem hohem Drehmoment. Es ist von großer Bedeutung, die axiale Verschiebung der Spindel aufgrund thermischer Effekte zu begrenzen und um Toleranzabweichungen am Werkstück zu reduzieren. Bei indirekt angetriebenen Spindeln hingegen ist die thermische Trennung zum Prozess besser gewährleistet. Allerdings führt der begrenzte mechanische Wirkungsgrad des Getriebes zu einer weiteren Reduzierung des Gesamtwirkungsgrads der Spindel. Daher muss bei der Auswahl des Spindelantriebs sorgfältig abgewogen werden, welche Kombination von Eigenschaften am besten zu den spezifischen Anforderungen der Anwendung passt ([5], S. 853–856)

Einige Statistiken zeigen, dass die meisten Spindelmotoren Induktionsmotoren sind, gefolgt von Synchronmotoren. Aufgrund der hohen Anforderung der Energieeffizienzklasse, führt es dazu, dass die Asynchronmotoren durch effizientere Motoren ersetzt werden müssen ([6], S. 280–283).

Eine Studie wurde durchgeführt, um Synchronreluktanzmotoren mit und ohne Permanentmagneten zu testen, um Alternativen zum teureren Synchronmotor zu finden. Beide erfüllen die Anforderungen der IE 4 Energieeffizienzklasse. Allerdings weisen sie eine höhere Drehmomentwelligkeit auf, was die Notwendigkeit komplexerer

Wechselrichtersysteme mit sich bringt. Ein effizienter Motor mit geringerer Wärmeabgabe führt zu einer verringerten Kühlanforderung, was den Gesamtenergiebedarf weiter reduziert. ([7], S. 219–221)

Die (Abb. 3) stellt das Wirkungsgraddiagramm eines Induktionsmotors dar und illustriert den begrenzten Bereich für einen energieeffizienten Betrieb. Sowohl Induktionsmotoren als auch Synchronmotoren können bei hohen Belastungen und Drehzahlen eine hohe Energieeffizienz aufweisen. Allerdings nimmt die Energieeffizienz drastisch ab, wenn es um kleine Drehmomente und niedrige Drehzahlen geht. Eine optimale Energieausnutzung würde erfordern, dass der Motor nahe dem Nennbetriebspunkt betrieben wird, trotz eines erweiterten Spektrums an Verarbeitungsverfahren. ([8], S. 260–262)

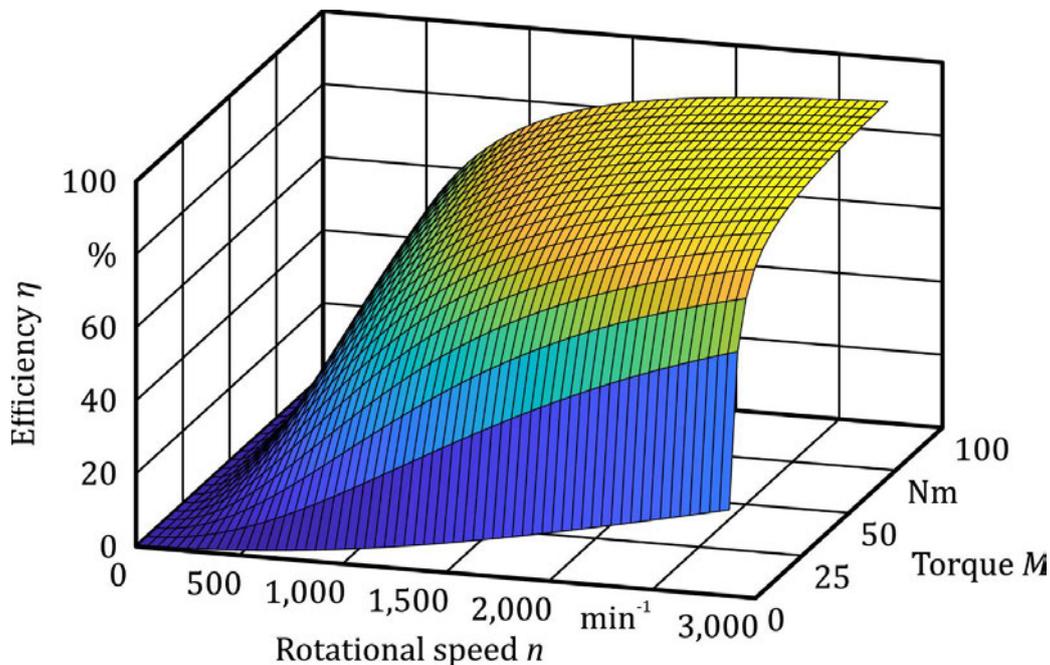


Abbildung 3: Wirkungsgraddiagramm eines beispielhaften 25kW Spindelinduktionsmotors ([2], S.652)

Softwarebasierte Modifikationen an Hauptspindelantrieben können in die Kategorien Steuerung und Betrieb unterteilt werden. Eine Studie nach [9] hat einen Look-Ahead-Algorithmus entwickelt, der den Hauptfluss von Induktionsmotoren in Hauptspindelantrieben steuert, um das Steuerungssystem zu optimieren. Durch die Verringerung des Hauptflusses kann bei gleichem Drehmoment ein höherer drehmomenterzeugender Strom fließen. Dies hat Auswirkung auf die Regelbarkeit, dies schwächt und re-

duziert andererseits die elektrischen Verluste des Asynchronmotors bei geringen Lasten. Je nach erwarteter Belastung (geschätzt anhand der erwarteten Schnittkräfte) wird der Fluss erhöht oder verringert. Aufgrund des induktiven Verhaltens von Induktionsmotoren erfolgt die Erhöhung des Flusses nur sehr langsam. Die Studie untersucht auch die Reduzierung der PWM-Frequenz. Um den Betrieb energieeffizienter zu gestalten, kann die Energieverlustoptimierung durch eine kurze Hochlaufphase der Spindel erreicht werden, um den Spindelrotor möglichst wenig zu beschleunigen und zu bremsen. ([10], S. 801–802)

2.3.2 Kühlschmierstoffsysteme

Das Kühlschmierstoffsystem hat eine Vielzahl von Hauptaufgaben, die dazu beitragen, einen effektiven Betrieb der Werkzeugmaschine sicherzustellen. Hierzu zählen in erster Linie die Kühlung und Schmierung der Kontaktzone zwischen Werkstück und Werkzeug, um die Reibung zu reduzieren und die Wärmeentwicklung zu kontrollieren. Darüber hinaus ist das System auch für den Spantransport verantwortlich, indem es dabei hilft, den Abrieb der Werkzeuge zu minimieren und das Werkstück sauber zu halten. Um für eine hohe Qualität des Werkstücks zu sorgen, spielt der Schmierstoff auch eine entscheidende Rolle, da er die Werkstückoberfläche vor Beschädigungen und Verunreinigungen schützt. Dies ist besonders wichtig bei der Bearbeitung von empfindlichen Werkstücken oder solche mit einer hohen Präzisionsanforderung. Der Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS) ist jedoch mit erheblichen ökonomischen und ökologischen Kosten verbunden. Die ökonomischen Kosten umfassen die Kosten für die Beschaffung, Aufbereitung und Entsorgung sowie die elektrische Energie für Pumpen und Aufbereitungsanlagen z.B. Filteranlagen. Die ökologischen Auswirkungen sind oft auf die umweltschädliche Zusammensetzung der Kühlschmierstoffe zurückzuführen. Bei unsachgemäßer Entsorgung können diese Flüssigkeiten Gesundheitsrisiken für den Maschinenführer verursachen und zu Umweltschäden führen. Ein besonderes Augenmerk liegt auf den verschiedenen Pumpen im Kühlschmierstoffkreislauf, da sie einen erheblichen Anteil am elektrischen Energiebedarf haben. ([11] S. 120–122)

Flüssige Kühl- und Schmiermittel finden vorrangig in Fertigungsprozessen Anwendung. Es existieren drei unterschiedliche Strategien, um diese Flüssigkeiten in den Kontaktbereich eines Schleifprozesses einzubringen: Überflutungsschmierung, Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung. Der Hauptunterschied zwischen

diesen Strategien liegt in der eingesetzten Flüssigkeitsmenge. Die Überflutungsschmierung wird für eine Kühl- und Schmiermittelzufuhr von mehr als 2 Liter pro Minute genutzt. In der Praxis variiert die zugeführte Flüssigkeitsmenge typischerweise zwischen 10 und 100 Litern pro Minute. Allerdings geht die Überflutungsschmierung auch mit dem Bedarf an zusätzlichen Maschinen und Geräten zur Luft- und Kühlschmierstofffiltration oder zur Werkstückreinigung einher. Dies resultiert zu einem erhöhten Energiebedarf. Im Falle der Minimalmengenschmierung werden verschiedene Mengenangaben gemacht, beispielsweise 10 bis 50 ml/ Stunde oder 50 bis 500 ml/ Stunde. Diese Strategie ermöglicht eine Reduzierung der Kosten für Schmierstoffe und Entsorgung sowie des Bedarfs an Filtrationsanlagen. Bei der Trockenbearbeitung wird komplett auf den Einsatz von Kühl- und Schmiermedien verzichtet. Dies bietet ähnliche Vorteile wie die Minimalmengenschmierung, da weder ein Filtersystem noch der Einsatz von Kühlschmierstoffen erforderlich ist. Allerdings erhöht sich das Risiko für thermische Schäden, und es können geringere Materialabtragungsraten erzielt werden, was zu einer verringerten Oberflächenqualität führt. ([12], S. 564–565)

Die Energieeffizienz von Kühlschmierstoffsystemen in Schleifprozessen wurde von Madanchi et al. untersucht. Die Studie konzentriert sich auf die Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung (E_{kss}). ([12], S. 566)

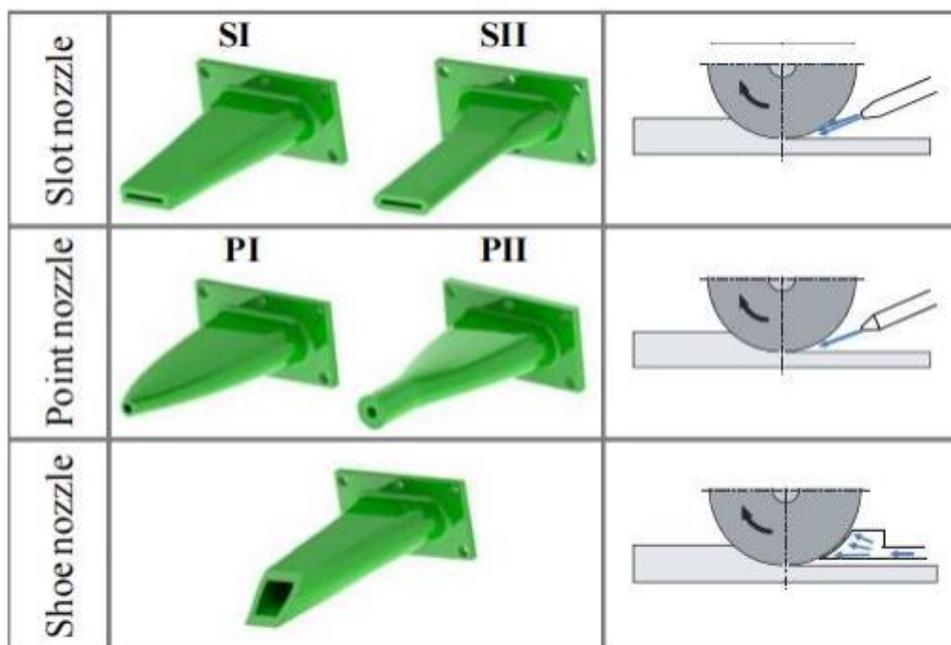


Abbildung 4: Übersicht der eingesetzten Düsen ([10], S. 567)

Mit der Gleichung 2.1 wird eine sinnvolle Schmierstoffversorgung berechnet. Dabei ist Q_{KSS} die Gesamtmenge der aufgetragenen KSS und $Q_{KSS,Sinnvoll}$ ist die sinnvolle KSS, die die Kontaktfläche von Schleifprozess erreichen kann.

$$E_{KSS} = \frac{E_{KSS,Sinnvoll}}{Q_{KSS}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Mit der Gleichung 2.2 wird die Beziehung zwischen Leistung und Durchfluss für Kühlschmierstoffpumpe berechnet.

$$P_{pumpe} = \frac{Q_{KSS} \cdot P_{KSS} \cdot \rho_{KSS}}{600 \cdot \eta_{pumpe}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Dabei ist P_{KSS} der Pumpendruck, ρ_{KSS} die Dichte der Kühlschmierstoffs und η_{pumpe} der Wirkungsgrad der Pumpe. ([12], S. 567) Zusätzlich zur Zuführungsstrategie spielt die Wahl eines geeigneten Düsentyps eine bedeutende Rolle bei der Verbesserung des Schleifprozesses. Um die Auswirkungen verschiedener Düsentypen auf die Effizienz der Kühlschmierstoffzuführung und die Leistungsaufnahme der Pumpe zu untersuchen, führten Madanchi et al. entsprechende Experimente durch und analysierte die daraus resultierenden Ergebnisse. Die in (Abb. 4) dargestellte Auswahl, der für die Versuche verwendeten Düsen verdeutlicht die Methodik und Vorgehensweise der Studie. In der Studie wurden zwei verschiedene Typen von Überflutungsdüsen getestet. Düse I besitzt eine konische Form mit einer graduellen Änderung des Querschnitts, während Düse II eine gerade Düsenlänge ohne Veränderung des Querschnitts aufweist. Zusätzlich wurden zwei nicht überflutende Punktdüsen entwickelt und analysiert. Als Referenz wurde eine Schuhdüse mit einer Geometrie, die an die Schleifscheibe angepasst ist, getestet. Die eingesetzten Schleifmaschinen wurden speziell für die Experimente entwickelt, um die Gesamtmenge an Kühlschmierstoff während des Schleifprozesses aufzufangen und den nutzbaren Kühlschmierstoff vom nicht nützlichen Kühlschmierstoff zu trennen. Dadurch konnte der Kühlschmierstofffluss durch die Kontaktzone gemessen werden. Alle verwendeten Düsen wurden mittels

des 3D-Druckverfahrens herstellt, was eine präzise und standardisierte Fertigung ermöglichte. Die Düsen wurden mit verschiedene Kühlschmierstoffgeschwindigkeiten und Durchflussmengen getestet, wobei die Schnittgeschwindigkeit der Schleifscheibe konstant bei 25 m/s gehalten wurde. Die Punktdüse PI, die Schlitzdüse SI und die Schlitzdüse SII wurden zusätzlich in einer tangentialen Position mit einem Winkel von 20° getestet. Die Versuchsparameter und Ergebnisse sind in der (Abb. 17) dargestellt.

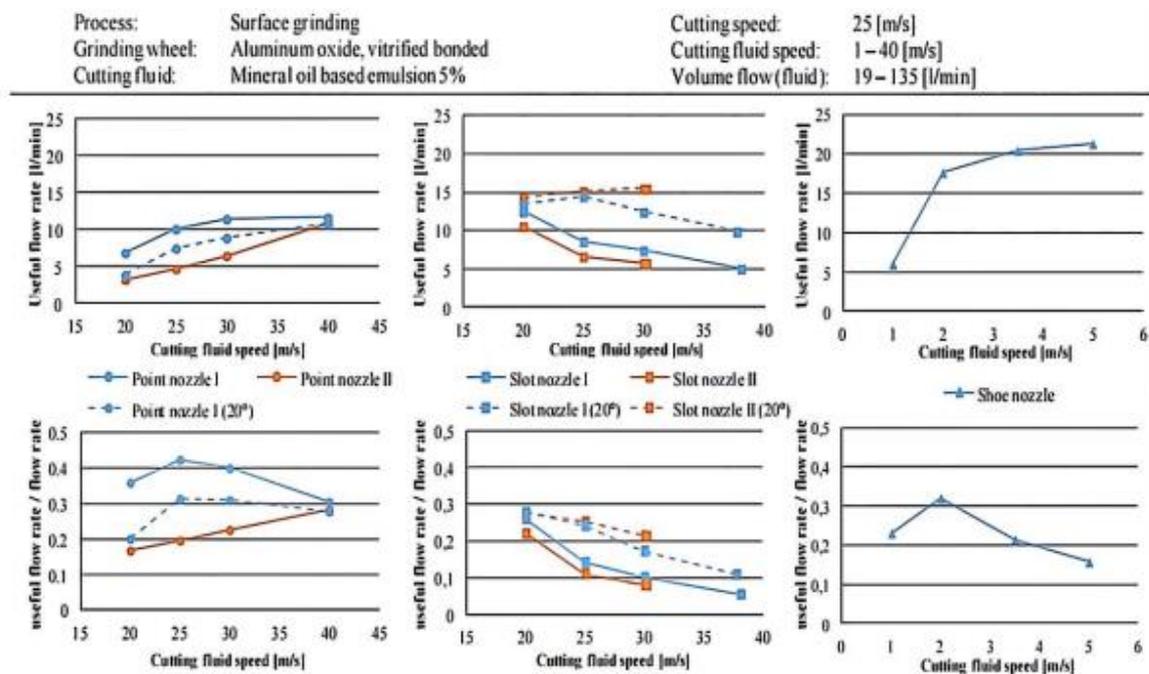


Abbildung 5: Nutzbarer Schneidstoffdurchsatzes in Abhängigkeit vom Düsendesign ([10], S. 568)

Bei den Schlitzdüsen zeigen sich andere Verhältnisse. Die Effizienz der Kühlschmierstoffversorgung der S-Düsen liegt über den Geschwindigkeiten von 20 bis 40 m/s bei weniger als 30 %, wobei der höchste Wirkungsgrad bei 20 m/s erreicht wird. Im Vergleich dazu weisen SII-Düsen bei 20° Grad eine höhere Effizienz als die SI- Düsen bei 20° Grad. SII bei 20° Grad sorgt auch dafür, dass der Durchfluss des sinnvollen Kühlschmierstoffs mit zunehmender Kühlschmierstoffgeschwindigkeit nach 25 m/s langsam ansteigt, im Gegensatz zu den anderen Fällen, wo die Durchflussmenge mit der Geschwindigkeit abnimmt.

Der sinnvolle Durchfluss, der mit der Schuhdüse erzielt werden kann, ist zwar hoch, aber dies gilt lediglich für niedrige Kühlmittelgeschwindigkeiten im Bereich von 1–5

m/s. Es ist wichtig zu beachten, dass es sich bei den Schuhdüsen um Überflutungsdüsen handelt, die eine erhebliche Menge an Schneidflüssigkeiten benötigen. Dies führt in der Regel zu einer ineffizienten Verwendung von Kühlschmierstoffen. ([12], S. 568)

Basierend aus den Experimenten von Madanchi et al. lässt sich schlussfolgern, dass der Typ, das Design und die Position der Düse einen signifikanten Einfluss auf die Zufuhr des Schneidstoffs haben. Es wurden einige Konstruktion identifiziert, die die Düseneffizienz optimieren können. ([12], S. 566)

- Ein scharfkantiger Düsenaustritt
- Eine hohe Oberflächenqualität und Rauheit im inneren der Düse
- Glatte, konkave oder parabolische Übergänge am Ende der Düse
- Ein Winkel von mehr als 7 Grad für alle Schrägen und Übergänge
- Eine minimale gerade Düsenlänge

2.3.3 Kühlsystem

Die (Abb. 2) zeigt, dass die Kühlung einer Werkzeugmaschine etwa 15 % des Gesamtenergiebedarfs verbraucht. Die Aufgabe der Kühlung besteht darin, die Temperatur des Hauptspindelmotors, der Lager, des Schaltschranks, der Steuerungs- und Leistungselektronik und der gesamten Maschine zu senken und um sicherzustellen, dass die Maschine während des Bearbeitungsprozesses stets auf optimaler Betriebstemperatur bleibt. Ein Abtransport der Wärme ist wichtig, da es sonst zu einem lokalen Wärmestau führen kann, welcher die Funktionsfähigkeit von empfindlichen Bauteilen beeinträchtigen oder sogar dauerhaft beschädigen kann. ([13], S. 770–772) Der Verdichter dominiert oft den Energiebedarf mit etwa zwei Drittel des Energiebedarfs im Bereich Kühlung. Flüssigkeitspumpen und Kondensatorventilatoren benötigen etwa ein Drittel. ([2], S. 655) Um die Energieeffizienz von Kühlsystemen zu verbessern, können verschiedenen Ansätze verfolgt werden. Einer dieser Ansätze besteht in der Optimierung einzelner Komponenten wie dem Kompressor oder der Pumpe. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Optimierung des gesamten Kreislaufdesigns. Durch diese Maßnahmen kann der Energieverbrauch der Kühlsysteme reduziert werden. Zu-

nächst wird auf die Optimierung des Verdichters eingegangen. Dabei haben sich folgende Ansätze in der Literatur als auch in Unternehmen durchgesetzt. ([14], S. 240–241)

- Getakteter Verdichter
- Heißgas- Bypass
- Frequenzgesteuerter Verdichter
- Digital- Scroll- Verdichter

Beim getakteten Verdichter besteht die Möglichkeit, den Kompressor abzuschalten, sobald er nicht mehr gebraucht wird. Konventionelle Kompressor sind dagegen immer unter Strom. Durch die Maßnahme, eine Hysterese zu schaffen, bei der der Kompressor zwischen Ein- und Ausschalten wechselt, ist es möglich, eine gewisse Menge an Energie zu sparen. Diese Idee ist effektiv, jedoch nur unter der Bedingung langer Intervalle zwischen dem Ein- und Ausschalten. Bei kurzen Intervallen kann die Lebensdauer des Verdichters negativ beeinflusst werden. Somit werden in der Hochpräzisionsbearbeitung häufig die Methode des Heißgas- Bypasses angewendet.

Mit einem Heißgas- Bypass kann die Wärmeabfuhr des Kühlaggregats gesteuert werden. In der (Abb. 6) ist das Heißgas- Bypass- Kühlsystem dargestellt. Dabei ist die durchgezogene Linie die Kühlflüssigkeit und die gestrichelte Linie das Kältemittelgas. Durch eine Verdrängerpumpe wird das in einem Tank gelagerte Kältemittel in die Maschine gepumpt. Die Kühlflüssigkeit fließt durch die Maschinenkomponenten, wie z. B. der Hauptspindel. Dabei entzieht die Kühlflüssigkeit der Werkzeugmaschine Wärme und überträgt sie auf das Kältemittel im Verdampfer. Die aufgenommene Wärme vom Kältemittel wird dann durch den Kompressor zum Kondensator geleitet, welche die Wärme dann an die Umgebungsluft abgibt. ([15], S.240–241) Um das Absinken der Temperatur unter eine bestimmte Untergrenze zu verhindern, wird über das Heißgas-

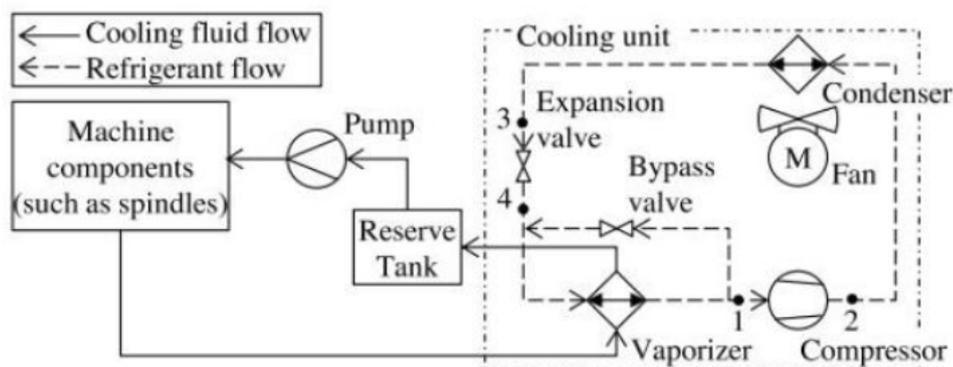


Abbildung 6: Heißgas-Bypassventil System ([7], S.15)

Bypass Ventil das Kältemittel direkt zum Verdichter geleitet, was zu einem sehr ungünstigen energetischen Zustand führt. ([2], S.655)

Die Regulierung der Kühlkapazität wird durch eine Anpassung des Kühlmittelvolumens realisiert. Eine Erhöhung der Temperatur vor dem Eintritt des Gases in den Verdampfer kann durch Trennung und Umgehung des Heißgasstroms erreicht werden. Mit steigender Temperatur nimmt die Kühlleistung ab und somit auch der Energiebedarf im Teillastbetrieb. Dabei werden zwischen zwei Methoden unterschieden, um dies zu bewerkstelligen. Der direkte Ansatz beinhaltet die Reduktion des Heißgasvolumen nach der Verdichtung, was ebenfalls zu einer Verringerung der Heißgasmenge im Verdampfer führt. Der indirekte Ansatz hingegen basiert auf die Trennung des Heißgases. Ein Teil des Stroms wird abgekühlt, während der andere heiße Teil mit dem kalten Strom gemischt wird, bevor beide in den Verdampfer gelangen. Die Kühlleistung kann in einem Bereich von 10 bis 100 % reguliert werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass ein Anteil der Energie im Bypass Prozess verloren geht. Infolgedessen ist die Energieeffizienz im Teillastbetrieb reduziert. ([7], S.15–16)

Dieses Problem wird mit einem frequenzgesteuerten Kompressor gelöst. Dazu wird die Inverter Technologie genutzt. Der Umrichter wandelt den Wechselstrom in Gleichstrom um. Der Gleichstrom-Inverter wandelt den Gleichstrom in ein künstlichen 3 Phasen-Strom um und führt die richtige Frequenz und Amplitude dem Gleichstrom-Verdichter zu, dieser passt die Drehzahl und benötigte Leistung an. Diese Technik hat den Vorteil, dass die Drehzahl gesteuert werden kann. Es ermöglicht eine Kühlleistung von 0– 100 %, mit einer Einsparung an Energiekosten von bis zu 70 %. In der (Abb. 7) ist der Unterschied zwischen einem herkömmlichen Kompressor und einem Inverter Kompressor zu sehen. [16]

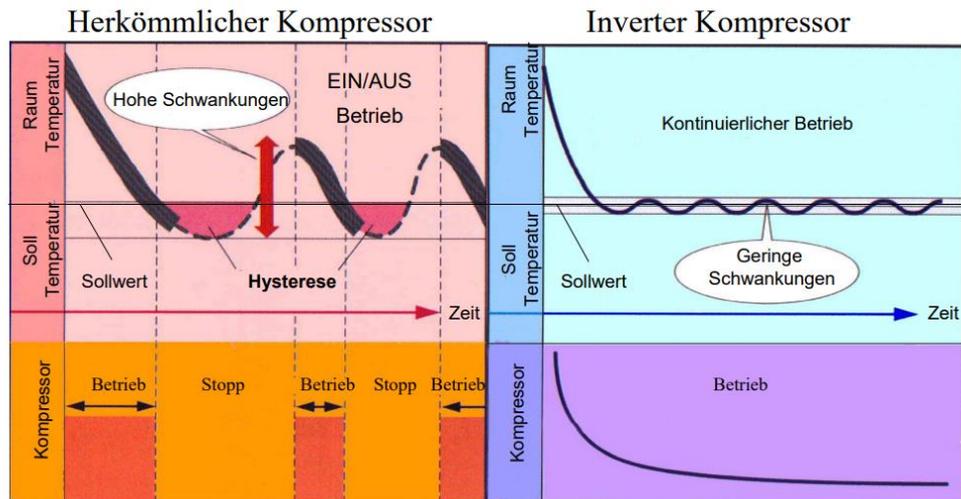


Abbildung 7: Vergleich zwischen einem herkömmlichen und einem Inverter Kompressor [8]

Mit dem Scroll Kompressor (Abb. 8) ist es möglich den Energieverbrauch auf bis zu 60 % zu reduzieren. Die Kühlleistung kann stufenlos zwischen 10 - 100 % bei konstanter Drehzahl variieren. Der Scroll Kompressor besteht aus dynamischen und statischen Spiralen, die sich ineinander verkämmen. Bei den Vorgängen Ansaugen, Verdichten und Entleeren, ist die statische Spirale am Rahmen befestigt und die dynamische Spirale wird von einer Exzenterwelle angetrieben und dreht sich um den Mittelpunkt der statischen Spirale. Das Kältegas wird durch den Kompressor in den Umfang der statischen Spirale gesaugt, mit einer Drehung der Exzenterwelle wird das Gas in einer Reihe von Kompressionskammern, welche aus dynamischen und statischen Spiralen besteht, komprimiert und dann kontinuierlich durch das axiale Loch entladen. Der Scroll Kompressor kann im Vergleich zu hoch modernen Heißgas-Bypass-Kühler ein Einsparpotenzial von ca. 20 % (Spindel unter Vollast) und 60 % (Maschine im Leerlauf) erreichen. Als konstruktive Variante des konventionellen Scrollverdichters ermöglichen digitale Scrollverdichter eine Druckmodulation von 10 bis 100 %. Dies wird durch eine vorübergehende Trennung der beiden Spiralen um ca. 1 mm erreicht, wodurch ein Druckausgleich zwischen Ansaug- und Austrittsseite entsteht. In einem lastfreien Zustand ist es nicht möglich, Druck aufzubauen. Dadurch wird der Energiebedarf auf das Leerlaufniveau reduziert. Das Verhältnis zwischen den regulären Kompression und dem lastfreien Betrieb während eines Rotationszyklus der bewegten Spirale bestimmt den Grad der Modulation. Diese Technologie bietet mehrere Vorteile,

darunter eine geringere Anzahl beweglicher Teile, eine konstante Antriebsgeschwindigkeit, die zu einer kontinuierlichen Kältemittelzirkulation führt, und weniger elektromagnetische Störung. Zudem ermöglicht sie eine präzise Temperaturregelung. ([2], S. 656)

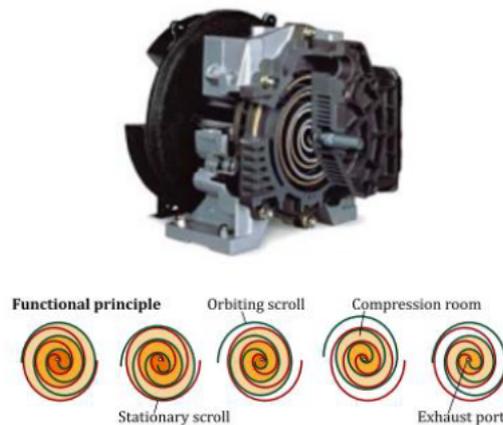


Abbildung 8: Aufbau und Funktionsweise von einem Scroll Kompressor ([2] S. 656)

Es gibt somit verschiedene Möglichkeiten, um die Energieeffizienz der Kühlsysteme zu erhöhen. Einerseits kann die Optimierung einzelner Komponenten wie Pumpen und Kompressor dazu beitragen. Andererseits kann auch eine Optimierung der gesamten Kreislaufgestaltung von Vorteil sein. In vielen Fällen werden Ansätze verfolgt, die eine bedarfsgerechte Auslegung und Betrieb des Kühlsystems ermöglichen. Darüber hinaus gibt es auch indirekte Ansätze, die sich auf die Verringerung der Belastung des Kühlsystems konzentrieren. Hierzu gehören beispielsweise Maßnahmen zur Minimierung thermischer Verluste und die Integration von Komponenten mit einem erweiterten thermischen Betriebsbereich. ([2], S. 656)

2.3.4 Vorschubantrieb

Im Vergleich zu den energieintensiven Nebenaggregaten wie dem Kühlsystem, weisen Vorschubantriebe einen vergleichsweise geringeren elektrischen Energiebedarf auf. Wie in (Abb.2) zu sehen ist, liegt der Energiebedarf bei etwa 12 %. ([17], S. 6–7) Der geringe elektrische Energiebedarf bei Vorschubantrieben ergibt sich aus ihren spezifischen Aufgaben, die hauptsächlich für die Steuerung der linearen oder rotierenden Bewegung zuständig sind. Dennoch spielen Vorschubantriebe aufgrund ihres breiten Einsatzes in automatisierten Produktionsmaschinen und ihrer unmittelbaren Nähe zum Bearbeitungsprozess eine bedeutende Rolle für die Energieeffizienz. Dies liegt

daran, dass sie bestimmen können, wie schnell ein bestimmter Prozess ausgeführt werden kann und wie viele Einstellungen für jeden Prozess erforderlich sind. Es wurde festgestellt, dass ein Doppelspindelsystem den Energiebedarf im Vergleich zum Einsatz zweier Einzelmaschinen um bis zu 80 % reduzieren kann. [18] Leichtbaumaßnahmen bei beweglichen Bauteilen wie Schlitten und Arbeitstischen tragen zusätzlich dazu bei, den Energiebedarf von Vorschubantrieben zu senken. ([17], S. 858–860)

Die Effizienz von Vorschubantrieben in Drehmaschinen hängt auch stark vom Aufbau des Antriebssystems ab. Beispielsweise erzeugen Gantry- oder Master-Slave-Systeme in der Regel eine gewisse Kraft zwischen ihren Komponenten, was den Leerlaufstromfluss aller laufenden Motoren und damit deren Verluste erhöht. Es wurde ein Hybridkonzept aus einem Linearmotor in Kombination mit einem Kugelgewindebetrieb entwickelt. Der Linearmotor zeichnet sich durch seine hohe Energieeffizienz aus und ermöglicht schnelle Geschwindigkeitsbewegungen, was die Dynamik des Systems erhöht. Gleichzeitig wird ein Kugelgewindetrieb eingesetzt, um die hohen Kräfte während des Betriebs zu unterstützen. Durch die Kombination dieser beiden Komponenten wird erreicht, dass die Kraft des Linearmotors und das Drehmoment des Motors durch den Kugelgewindetrieb abgefangen und kontrolliert werden. Dadurch werden die Verluste im System minimiert und die Notwendigkeit einer intensiven Kühlung des Linearmotors reduziert. Das Ergebnis ist eine insgesamt verbesserte Effizienz des Antriebssystems, wodurch Energieeinsparungen erzielt werden können. Dieses Hybridkonzept bietet somit eine vielversprechende Lösung zur Steigerung der Effizienz von Vorschubantrieben in Drehmaschinen. ([19], S. 392)

Auch muss ein Kompromiss zwischen maximaler Produktivität und Effizienz der Vorschubantriebe gefunden werden. Da bei schneller Bewegung die Spitzenleistung von Werkzeugmaschinen und somit der höchste Energiebedarf der Vorschubantriebe anfällt. Hohe Beschleunigungen und Geschwindigkeiten der Vorschubantriebe erzeugen hohe Drehmomente, die zu erhöhten Kupferverlusten führen. Allerdings kann die Effizienz der gesamten Werkzeugmaschine durch eine Steigerung der Produktivität z. B. durch Reduzierung schneller Bewegungen, Optimierung des Werkzeugwegs und Minimierung von Werkzeugwechsel gesteigert werden. ([20], S. 1397–1400)

2.3.5 Hydraulikaggregate

Hydraulikaggregate dienen dazu verschiedenen Funktionen, wie Werkzeug- und Plattenwechsel, Werkstückspannung sowie Gewichtsausgleich bei einer Werkzeugmaschine zu ermöglichen. Darüber hinaus liefern sie den Hydraulikdruck für hydrostatische Lager und Führung. ([21], S. 182) Nach (Abb. 2) nimmt das Hydrauliksysteme etwas 11 % des Gesamtenergiebedarfs in Anspruch. Ein hoher Energiebedarf von Hydrauliksysteme in Leerlaufzeit lässt sich durch die Leckage Verluste erklären. ([22], S. 8–9)

Es haben sich folgenden Maßnahmen ergeben, um Hydraulikaggregate Energieeffizienter zu betreiben.

- Druckspeicher und Druckübersetzer
- Pumpen mit variabler Drehzahl
- Verstellpumpen
- Gerichtete Sitzventile
- Optimierte Komponenten mit Hydraulikkreislauf für minimale Leckagen

Die Verbesserung der Energieeffizienz in Hydrauliksystemen kann durch eine Optimierung des Komponentendesigns und den Einsatz von Sitzventilen erreicht werden. Dabei steigt das Einsparpotenzial mit dem Systemdruck. Die Auswirkung von Konstruktionsänderungen an Pumpen und Speichern hängen jedoch stark von der spezifischen Maschinenkonfiguration und dem Anwendungsfall ab. In der (Abb. 9) werden grundlegende Konstruktionskonzepte für Hydrauliksysteme in Werkzeugmaschinen veranschaulicht. [23]

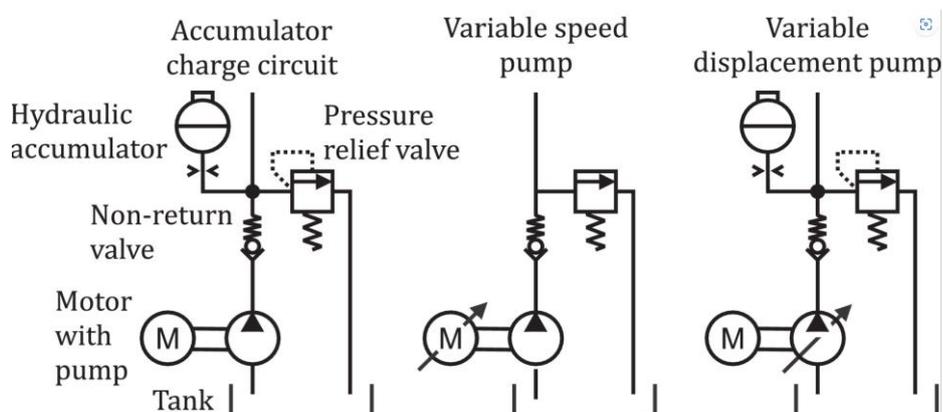


Abbildung 9: Grundlegende Konstruktionskonzepte für Hydraulikaggregate in Werkzeugmaschinen [22]

Die Kombination von Pumpen mit konstanter Drehzahl und Hydraulikspeichern stellt eine effiziente Lösung dar, insbesondere wenn die Hydraulikleistung sporadisch benötigt wird. Der Akkumulator ermöglicht ein schnelles Ansprechverhalten und den Einsatz von vergleichsweise kleinen Pumpen mit niedriger Leistung. Durch Integration mehrerer Speicher in Verbindung mit einer einzigen Pumpe können unterschiedliche Druckstufen erreicht werden, um den Anforderungen des Systems gerecht zu werden. Zusätzlich wird die Möglichkeit geboten, die Pumpe vollständig abzuschalten, wenn keine Hydraulikleistung benötigt wird, das hat den Vorteil, Leckagen zu reduzieren und somit Verluste im Hydrauliksystem zu vermeiden. ([2], S. 548)

Bei häufigerem Bedarf an Hydraulikleistung, zeigt die Konfiguration zunehmende Ineffizienz, da das wiederholte Starten der Pumpe zu einer erhöhten thermischen Belastung des Hydrauliksystems führt. Durch den Einsatz drehzahl geregelter Pumpen, die in der Regel von Frequenzumrichtern angetrieben werden, kann die Fördermenge und der resultierende Systemdruck entsprechend dem tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Diese ermöglicht eine energieeffiziente Lösung für Maschinenkonfiguration mit variierendem Hydraulikleistungsbedarf. Das Fehlen eines Akkumulators führt zu einer erhöhten Nennleistung der Pumpe sowie zu einer kontinuierlichen Betriebszeit zur Kompensation von Leckagen. Verstellpumpen stellen eine Alternative zu drehzahl geregelten Pumpen dar, um die Hydraulikleistung ohne zusätzliche Frequenzumrichter zu regulieren. Dennoch bedarf es elektrischer Energie, um Leckagenverluste auszugleichen, was zu längeren Reaktionszeiten führt. In Bezug auf die Energieeffizienz bieten Verstellpumpen eine sinnvolle Lösung für Anwendungen mit hohem hydraulischem Leistungsbedarf. ([2], S.658)

Abele et al. demonstrierte für einen spezifizierten Demonstratorprozess eine Reduzierung des elektrischen Leistungsbedarfs der Hydraulikeinheit um 91 % durch den Einsatz von Sitzventilen und Akkumulatoren. ([24], S. 46–48)

Hülsemeyer bestätigt, dass der Einsatz von Speichern die energieeffizienteste Lösung bei geringem hydraulischen Leistungsbedarf ist. ([2], S.659)

Brecher et al. verglich ein modernes Hydrauliksystem bestehend aus zwei Verstellpumpen für Nieder- und Hochdruck mit einer optimierten Hydraulikeinheit bestehend aus einer (Niederdruck-) Verstellpumpe und einem Druckübersetzer. Die optimierte

Hydraulikeinheit reduzierte die Leckage um 79 %, litt jedoch unter einer langsamen Reaktion. ([14], S. 187)

Eine weitere Forschung führte zu einem fortschrittlichen Aufbau einer Pumpe mit variabler Drehzahl (für hohe Drücke), einem Druckverstärker und zwei separaten Akkumulatoren für Nieder- und Hochdruckzyklen. Dabei konnten die Druckverluste im Leerlauf um 90 % und der Wirkleistungsbedarf um 26 % im Vergleich zu modernen Hydraulikeinheiten reduziert werden. ([22], S. 8–9)

2.3.6 Weitere Hilfsaggregate

Zu den Hilfsaggregaten gehören z.B. die Druckluftversorgung oder auch der Späneförderer. Druckluft ist wahrscheinlich die teuerste Energieform in einer Anlage, da nur 19 % ihrer Leistung nutzbar sind. Die Hauptursache für die geringe Effizienz der Druckluftversorgung sind Abwärme und vor allem Leckagen an Anschlüssen, Ventilen und Antrieben. In den USA machen Druckluftsysteme etwa 10% des gesamten industriellen Energieverbrauchs aus. ([25], S. 1136)

Die energetische Optimierung des Druckluftversorgungsnetztes ist notwendig, um die Gesamtenergieeffizienz von Werkzeugmaschinen zu verbessern, obwohl ihr Anteil am Gesamtenergieverbrauch vergleichsweise gering ist. Die Versorgung mit Druckluft für Lager-, Pneumatik- und Dichtungsanwendungen stellt nach der Versorgung mit flüssigen Medien und der Temperierung von Maschinenkomponenten einen erheblichen Teil des gesamten elektrischen Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen dar. ([26], S. 612–614)

Nach einigen Erkenntnissen ist der energieeffizienteste Ansatz, die Grundlast durch einen entsprechend dimensionierten Kompressor mit festem Drehzahltrieb zu bewältigen und die dynamischen Lasten mithilfe von drehzahlvariablen Antrieben auszugleichen. In der Studie von Denkena et al. wurde festgestellt, dass der Luftvolumenstrom und nicht der Druck als relevanter Steuerparameter in Druckluftversorgungsnetzten betrachtet werden sollte. Daher wird empfohlen, für einen konstanten Luftmassenstrom zu sorgen und den Druck bei Bedarf lokal zu erhöhen. Dies kann erreicht werden durch den Einsatz von Seitenkanalverdichtern oder Rotationskolbengebläsen. Insgesamt wird empfohlen, die Größe des Netzwerks und die Anzahl der

angeschlossenen Geräte zu reduzieren, beispielsweise durch den Ersatz der pneumatischen Aktoren durch elektromechanischen Aktoren. ([2], S. 659)

Der Späneförderer ist ein Hilfsaggregat welches dazu dient, die Späne aus dem Arbeitsraum in ein Spänecontainer abzutransportieren und gleichzeitig vom Kühlschmierstoff zu trennen. In Abhängigkeit von der Spanform, dem zeitlichen Späneaufkommen und der anfallenden Menge an Kühlschmierstoff werden verschiedene Arten von Förderern eingesetzt. Dazu gehören Scharnierbandförderer, Kratzerbandförderer, Magnetbandförderer und Schneckenförderer. Diese Förderer dienen dazu, die Späne effizient zu transportieren und den Kühlschmierstoff entsprechend abzu- leiten oder zurückzugewinnen. ([27], S. 607–613)

Die Nutzung von Prozesskenntnissen, wie z.B. dem tatsächlichen materialabtrag pro Zeiteinheit, ermöglicht die Umsetzung sinnvoller Steuerungsstrategien entsprechend den unmittelbaren Anforderungen des Prozesses. Dadurch ist es möglich, den Späneförderer in Nebenzeiten oder für Nachbearbeitungsarbeiten vollständig anzuhalten. ([2], S. 658)

Der Scharnierbandförderer mit Kühlmittelbehälter wird in der Industrie am häufigsten benutzt. In der (Abb. 10) wird ein solches System dargestellt.

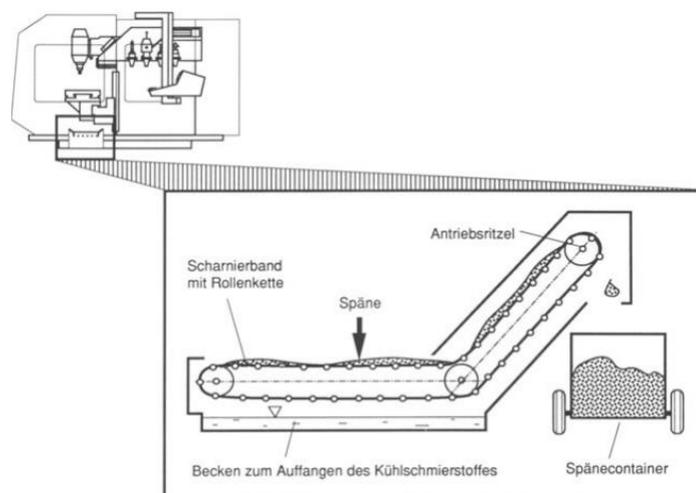


Abbildung 10: Scharnierbandförderer mit Kühlmittelbehälter ([10], S.607)

3 Vorgehensweise der ISO 14955-3

3.1 Einleitung in die ISO 14955-3

Die International Organization for Standardization (ISO) hat eine umfangreiche Sammlung von Normen entwickelt, die verschiedene Branchen und Themen abdecken. Eine dieser Normen ist die ISO 14955, die sich mit der umweltorientierten Bewertung von Werkzeugmaschinen befasst. Diese Norm bietet über fünf Teile einen Rahmen für die Bewertung und Messung der Umweltauswirkung von Werkzeugmaschinen und legt Grundsätze und Verfahren fest, um eine nachhaltigere Nutzung dieser Maschinen zu fördern.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird die ISO 14955-3 „Werkzeugmaschinen – Umweltorientierte Bewertung von Werkzeugmaschinen – Teil 3: Grundsätze zum Test von spanenden Werkzeugmaschinen im Hinblick auf Energieeffizienz“ näher betrachtet. Die ISO 14955 liefert umfassende Richtlinien und Testverfahren, die es ermöglichen, die Energieeffizienz von spanenden Werkzeugmaschinen objektiv zu bewerten.

3.2 Aufbau der ISO 14955-3

Dieser Abschnitt hat den Zweck, eine vereinfachte Darstellung der Norm zu bieten und einen Überblick darüber zu geben. Für ein tieferes Verständnis wird auf die ISO 14955 1-3 verwiesen.

3.2.1 Umfang der Norm

Die Norm startet zunächst mit einer Einführung. Hier werden die ersten drei Teile der Norm beschrieben. Die ISO 14055-1 definiert ein Analyse- und Bewertungsverfahren für Werkzeugmaschinen auf der Grundlage von Funktionseinheiten, um einen einheitlichen Ansatz zu ermöglichen. Diese Norm ermöglicht vereinfachte und allgemeine Bewertungsmethoden, um das energetische Verhalten und die Effizienzschwäche von Werkzeugmaschinen zu bewerten. Die ISO 14955-2 legt die erforderlichen Parameter und Messverfahren zur Bewertung des energetischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen fest. Sie definiert auch ein Referenzszenario, das den realen Maschinenprozess im Feld widerspiegelt. Die Messung und Definition dieses Referenzszenarios hilft

dabei, das Verbesserungspotenzial für bestimmte industrielle Anwendungen aufzuzeigen und die Methodik der ISO 14955-1 anzuwenden.

Die vorliegenden ISO 14955-3 berücksichtigen die relevanten Umweltauswirkungen während der Nutzungsphase von Werkzeugmaschinen auf der Grundlage von Referenzszenarien. Es werden methodische Ansätze definiert, um relevante Betriebszustände auf der Grundlage eines individuellen Referenzszenarios für die energetische Bewertung von Werkzeugmaschinen und die Integration von Energieeffizienzaspekten in der Konstruktion von Werkzeugmaschinen.

3.2.2 Normative Referenzen

Im zweiten Punkt werden die Normativen Verweise aufgeführt. Dabei wird auf ISO 14955-1:2017, Werkzeugmaschinen – Umweltbewertung von Werkzeugmaschinen – Teil1: Gestaltungsmethodik für energieeffiziente Werkzeugmaschinen und der ISO 14955-2:2018, Werkzeugmaschinen – Umweltbewertung von Werkzeugmaschinen – Teil2: Verfahren zur Messung der Energiezufuhr zu Werkzeugmaschinen und Werkzeugmaschinenkomponenten verwiesen. Sowie die DIN 8580:2003, Fertigungsverfahren – Begriffe und Definitionen, Einteilung.

3.2.3 Begriffe und Definitionen

Im dritten Punkt werden Begriffe definiert, die im Laufe der Norm auftreten.

3.2.4 Allgemeiner Ansatz für die Umweltbewertung von Werkzeugmaschinen

In diesem Abschnitt wird der Allgemeine Ansatz für die Umweltbewertung von Werkzeugmaschinen aufgeführt. Dieser Ansatz erfordert die Messung aller möglichen Betriebszustände der Werkzeugmaschine, einschließlich des Referenzszenarios, wie in Abschnitt 3.2.6 definiert. Auf Grundlage dieser Bewertung können signifikante Betriebszustände der Werkzeugmaschine ermittelt und einer Bewertung unterzogen werden, wodurch eine funktionsorientierte Analyse nach ISO 14955-1 durchgeführt werden kann. Die Abbildung 6 zeigt den Allgemeinen Ansatz und die Vorgehensweise für die Umweltbewertung einer Werkzeugmaschine. In den Schritten von M01 bis M08 wird die Leistung der Werkzeugmaschine bei verschiedenen Betriebszuständen aufgenommen.

Im Abschnitt M01 wird die Leistung im ausgeschalteten Zustand gemessen. Dabei wird die durchschnittliche mittlere Leistung in [kW] aufgenommen bei einer Messzeit von 300 Sekunden.

Im Abschnitt M02 wird die Leistung P_{start} [kW] einschließlich aller erforderlichen externen Medien, wie z.B. Druckluft, gemäß der Systemgrenzendefinition der Werkzeugmaschine beim Übergang von Aus in Standby (Start) gemessen. Der Hauptschalter wird von Aus auf Ein geschaltet und es wird gewartet, bis die Maschinen einen stationären Zustand erreicht. Die Messung enthält keine Achsenreferenz und keine Achsenbewegung.

Im Abschnitt M03 Standby wird die Leistung $P_{standby}$ [kW] und alle benötigten externen Medien wie z.B. Druckluft, entsprechend der Systemgrenzendefinition gemessen. Die Werkzeugmaschine befindet sich dabei in einem stationären Zustand. Die Messung sollte unter stabilen Bedingungen für eine Zeit, $t_{standby}$ von 300 Sekunden durchgeführt werden.

Im Abschnitt M04 wird die Leistung P_{setup} [kW] einschließlich aller erforderlichen externen Medien gemäß der Systemgrenzendefinition während der Prozessvorbereitung der Werkzeugmaschine und/ oder beim Warmlaufen gemessen. Diese Messung umfasst alle erforderlichen Aktivitäten zur Prozessvorbereitung der Werkzeugmaschine. Dieser Zustand kann werkzeugmaschinenspezifische Aufwärmzeiten beinhalten. Zu diesen Aktivitäten zählt unter anderem das Verfahren von Achsen, das Fixieren von Werkstücken und das Reinigen des Prozessbereichs. Dieser Zustand hängt von der Werkzeugmaschine ab. Einige Werkzeugmaschinen benötigen diesen Zustand Setup nicht.

Im Abschnitt M05 wird die Leistung P_{Ready} [kW] einschließlich aller externen Medien gemäß der Systemgrenzendefinition der Werkzeugmaschinen im Werkzeugmaschi-

nenzustand Ready gemessen. In diesem Punkt steht die Werkzeugmaschine unmittelbar vor der Bearbeitung. Die Prozessvorbereitung, einschließlich Aufwärmen, Achsenreferenz und Einrichten sind bereits abgeschlossen. Die Werkzeugmaschine ist bereit für die Bearbeitung und wartet auf Startsignal. Dabei ist zu beachten, dass die Messung durchgeführt werden soll, wenn stabile Bedingungen erreicht sind. Dazu gehört ein Messzeit von mindestens 300 Sekunden.

Im Abschnitt M06 wird die Leistung $P_{Processing}$ [kW] einschließlich aller erforderlichen externen Medien gemäß der Systemgrenzendefinition der Werkzeugmaschine während des Referenzszenarios gemäß der Definition (siehe Abschnitt 3.2.6) gemessen. Dieser Werkzeugmaschinenzustand repräsentiert die typische individuelle Werkzeugmaschinenbearbeitung. Die Messung zielt darauf ab, die durchschnittliche Leistung während der Bearbeitung der Werkzeugmaschinen einschließlich der zugehörigen Komponentenaktivitäten anzugeben. Dieser Werkzeugmaschinenzustand ist Prozessabhängig.

Im Abschnitt M07 wird die Leistung P_{EStop} [kW] einschließlich aller benötigten Medien, entsprechend der Systemgrenzendefinition der Werkzeugmaschine gemessen. Nach $t_1 = 30$ Sekunden wird während des Maschinenzustands Standby der Not- Aus eingeleitet. Die Messung sollte unter stabilen Bedingung im Maschinenzustand Not- Aus eine Zeit t_{EStop} von mindestens 300 Sekunden betragen. Dabei ist der Not- Aus zu bevorzugen, da einige Anwender diesen Punkt auch mit einem nicht betrieb der Werkzeugmaschine vergleichen.

Im Abschnitt M08 wird die mittlere Leistung P_{SWO} [KW] einschließlich aller benötigten Medien, gemäß der Systemgrenzendefinition der Werkzeugmaschine beim Übergang vom Zustand Standby in den Zustand Aus gemessen. Nach $t_1 = 30$ Sekunden wird die Werkzeugmaschine nach dem Werkzeugmaschinenhersteller angegebenen typischen Abschaltverfahren abgeschaltet. Sobald die Werkzeugmaschine einen stabilen Zustand bei t_2 erreicht, ist die Messung beendet.

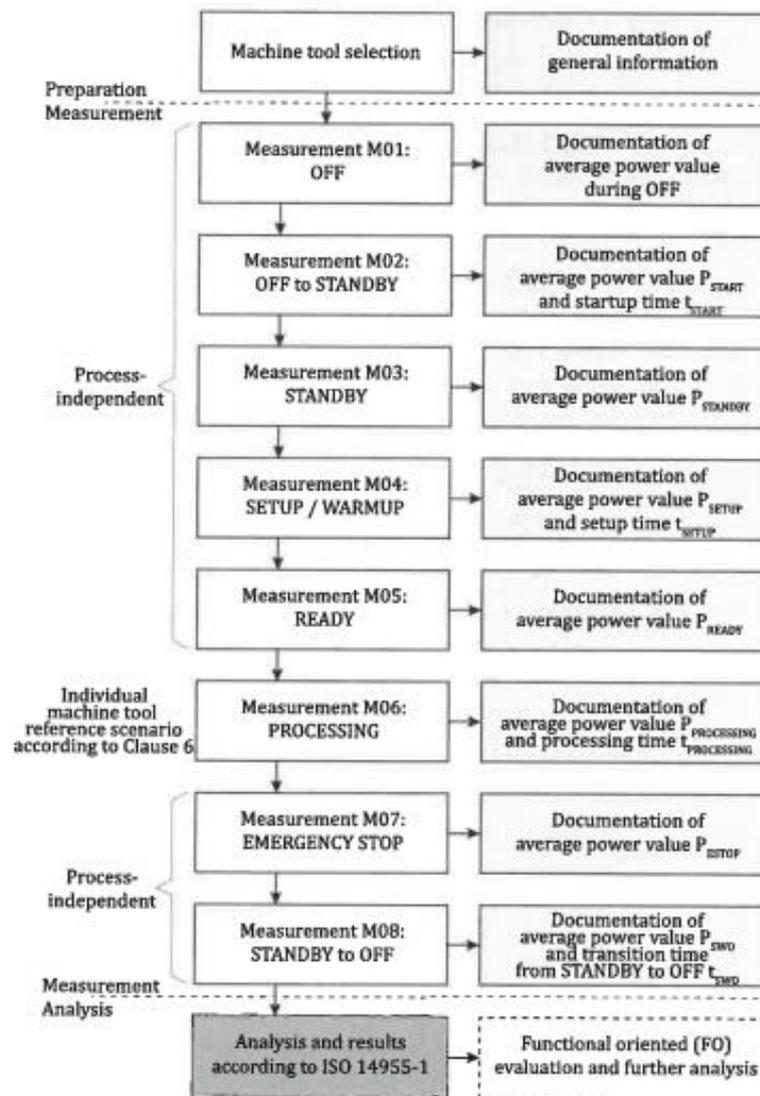


Abbildung 11: Allgemeiner Ansatz für die Umweltbewertung

3.2.5 Durchschnittliche Leistung der Werkzeugmaschine

Basierend auf der vorliegenden Information und den durchgeführten Messung für alle relevanten Betriebszustände der Werkzeugmaschine sowie den daraus resultierenden EnPi- Werten, werden die Bewertung in diesem Abschnitt der Norm durchgeführt.

Die durchschnittliche Leistung der Werkzeugmaschine ermöglicht eine Schätzung des Energieaufwands, der den zeitlichen Anteilen der verschiedenen Betriebszustände der Werkzeugmaschine entspricht. Diese Anteile werden auf der Grundlage eines Produktionsjahres definiert. Die (Abb. 12) zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Tabelle.

Table 10 — Default time share of operating states

	OFF	STANDBY	SETUP	READY	PROCESS- ING	EMERGEN- CY STOP	OTHERS (transient operating states)
Share per year	5 %	15 %	10 %	5 %	60 %	5 %	0 %
Share value per year	$S_{\text{OFF}} = 0,05$	$S_{\text{STANDBY}} = 0,15$	$S_{\text{SETUP}} = 0,1$	$S_{\text{READY}} = 0,05$	$S_{\text{PROCESSING}} = 0,6$	$S_{\text{ESTOP}} = 0,05$	$S_{\text{O}} = 0$
S_{OFF} : Share value of machine tool state OFF per year S_{STANDBY} : Share value of machine tool state STANDBY per year S_{SETUP} : Share value of machine tool state SETUP per year S_{READY} : Share value of machine tool state READY per year $S_{\text{PROCESSING}}$: Share value of machine tool state PROCESSING per year S_{ESTOP} : Share value of machine tool state ESTOP per year S_{O} : Share value of machine tool state OTHERS per year							

Abbildung 12: Standardzeitanteil der Betriebszustände

Um die Anteile der Betriebszustände bewerten zu können, ist es notwendig auf individuelle Anteile von Betriebszustände zurückzugreifen, die die tatsächliche Nutzung der Werkzeugmaschine, einschließlich der Zeiten im Aus- Zustand, im Standby- Zustand usw. abbilden. Sollte der individuelle Anteil der Betriebszustände weder dem Benutzer noch dem Hersteller der Werkzeugmaschine bekannt sein, wird der in Tabelle 10 (Siehe Abb. 12) angegebene Anteil der Betriebszustände verwendet. Das entsprechende Verfahren zur Anwendung dieser Anteile ist in Abbildung 10 (Siehe ISO 14955-3) dargestellt.

Die (Abb. 12) beinhaltet standardisierte Zeitanteile der Betriebszustände, die auf umfangreichen Messungen in Werkstätten und Produktionsbereichen basieren. Diese Anteile werden verwendet, wenn ein individueller Zeitanteil nicht definiert oder bekannt ist.

Im Anschluss kann die geschätzte Energiezufuhr auf Grundlage der definierten Anteile der jeweiligen Betriebszustände mit der Formel (1) (Siehe ISO14955-3) berechnet werden. Dabei ist zu beachten ob die Werkzeugmaschinen über 365 Tage produziert oder mit einem anderweitigen Schichtmodell arbeitet. Dazu sind in der Norm zwei Beispiel aufgeführt die je nach anwendungsfall zu beachten sind.

3.2.6 Referenzszenario der Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschinen sind komplexe Systeme, die aus verschiedenen Komponenten wie Spindeln, Führungen, Antrieben, Lüftern und Motoren bestehen. Diese Komponenten haben individuelle Konfigurationen und spezifische Anwendungen. Das energetische Verhalten von Werkzeugmaschinen und die damit verbundenen Maßnahmen zur Optimierung der Energieeffizienz sind stark von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu gehören die Konfiguration der Werkzeugmaschine, der Bearbeitungsprozess, die Anwendung, die aktiven Komponenten und ihre Steuerung, der Betriebszustand der Werkzeugmaschine, die Fertigungsumgebung und die individuelle Handhabung.

Aufgrund der Vielfalt und Heterogenität zerspanender Werkzeugmaschinen ist es schwierig, ein standardisiertes Referenzteil oder Verfahren mit definierter Geometrie und Materialeigenschaften festzulegen. Ein spezifisches Referenzteil ist in der Regel auf eine bestimmte Werkzeugmaschine und ihre Konfiguration geeignet. Bestimmte Kombinationen von Werkzeugmaschinen und Werkstücken sind in industrielle Anwendung nicht realistisch oder üblich. Daher können energetische Bewertung und Empfehlung zur Optimierung der Energieeffizienz, die auf unrealistischen oder unüblichen Bearbeitungsanwendungen basieren, Irreführend sein und zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Somit wird in diesem Dokument kein standardisiertes Referenzteil definiert, da es die realistische Anforderung einer spanabhebenden Werkzeugmaschinenanwendung im industriellen Umfeld nicht widerspiegeln kann. Stattdessen konzentriert sich das Dokument auf die Definition individueller Referenzszenarien, die maschinen- und anwendungsabhängig sind. Diese individuellen Referenzszenarien sollen sicherstellen, dass typische Bearbeitungsprozesse, wie sie in der Industrie üblich sind, bewertet werden. Das Referenzszenario repräsentiert den beabsichtigten Wertschöpfungsprozess auf der jeweiligen Werkzeugmaschine. Es ist jedoch nicht für den direkt Vergleich zwischen verschiedenen Werkzeugmaschinen gedacht.

3.2.7 Auswertung

Im letzten Schritt wird der Mittelwerte der elektrischen Leistung von den jeweiligen Betriebszustände berechnet und anschließend ausgewertet. Dazu werden die berechneten Mittelwerte anhand der in der Norm vorhandenen Tabelle berechnet.

	OFF	STANDBY	SETUP	READY	PROCESS- ING	EMERGEN- CY STOP	OTHERS (transient operating states)
Share per year	5 %	15 %	10 %	5 %	60 %	5 %	0 %
Share value per year	$S_{\text{OFF}} = 0,05$	$S_{\text{STANDBY}} = 0,15$	$S_{\text{SETUP}} = 0,1$	$S_{\text{READY}} = 0,05$	$S_{\text{PROCESSING}} = 0,6$	$S_{\text{ESTOP}} = 0,05$	$S_0 = 0$
Measured average power P [kW] per op- erating state	0,012 5	1,876	2,696	3,035	4,799	1,189	0
Calculated energy E [kWh] for one year per operating state	$0,05 \cdot 0,0125 \cdot 365 \cdot 24 = 7,884$	$0,15 \cdot 1,876 \cdot 365 \cdot 24 = 2\,465,064$	$0,1 \cdot 2,696 \cdot 365 \cdot 24 = 2\,361,696$	$0,05 \cdot 3,035 \cdot 365 \cdot 24 = 1\,329,33$	$0,6 \cdot 4,799 \cdot 365 \cdot 24 = 25\,223,544$	$0,05 \cdot 1,189 \cdot 365 \cdot 24 = 520,782$	$0 \cdot 0 \cdot 365 \cdot 24 = 0$

Abbildung 13: geschätzte Energie E pro Jahr auf der Grundlage des individuellen Zeitanteils der Betriebsdaten

Hier in diesem Beispiel erhält man dann einen kalkulierten Energieverbrauch E für die jeweiligen Betriebszustände. Anschließend wird der Energieverbrauch der einzelnen Betriebszustände addiert, um den Gesamtenergieverbrauch zu ermitteln (Siehe Gl. 3.1)

$$E = \left(\begin{array}{l} 0,05 \cdot 0,0125 + 0,15 \cdot 1,876 + 0,1 \cdot 2,696 + \\ 0,05 \cdot 3,035 + 0,6 \cdot 4,799 + 0,05 \cdot 1,189 \end{array} \right) \cdot (365 \cdot 24) \quad \text{Gl. 3.1}$$

$$E = 31906 \text{ kWh}$$

Schlussfolgerung

Anhand der Rechnung lässt sich schlussfolgern, in welchem Betriebszustand der Energieverbrauch am größten ist. In diesem Fall würde man im Betriebszustand STANDBY und PROCESSING die ersten Optimierungsmaßnahmen tätigen, da dort der Energieverbrauch am größten ist.

3.3 Kritische Bewertung der Norm 14955-3

Die Norm „Werkzeugmaschinen – Umweltorientierte Bewertung von Werkzeugmaschinen – Teil 3: Grundsätze zum Test von spanenden Werkzeugmaschinen im Hinblick auf Energieeffizienz“ (DIN EN ISO 14955-3) präsentiert sich als äußerst strukturiertes und gut organisiertes Regelwerk, das es dem Anwender erleichtert, sie effektiv zu nutzen und die Energieeffizienz der jeweiligen Betriebszustände auf ein Referenzszenario zu bewerten.

Jedoch ist festzustellen, dass die Norm ausschließlich die Energieeffizienz der spanenden Werkzeugmaschine während des Betriebs untersucht, jedoch andere Phasen ihres Lebenszyklus wie Herstellung, Transport, Installation und Entsorgung außer Acht lässt. Wichtige Komponenten, die einen Einfluss auf die Gesamtenergieeffizienz haben könnten, wie etwa die Energieintensität der Herstellung und des Transports der Maschine, werden nicht berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die Norm den Energieverbrauch und die Umweltauswirkungen, die mit der Beschaffung und dem Transport der Werkzeugmaschine verbunden sind, nicht miteinbezieht.

Aber auch die Ergebnisse der Tests liefern keine detaillierte Aufschlüsselung der Energieverbrauchsmuster der individuellen Aggregate oder Komponenten innerhalb der Werkzeugmaschine. Eine gezielte Analyse der Aggregate könnten Einblicke liefern, welche Komponenten möglicherweise optimiert oder modernisiert werden könnten, um den Energieverbrauch zu reduzieren. Beispielsweise könnten einzelne Antriebe, Pumpen, Kühlsysteme oder andere Komponenten identifiziert werden, die eine größere Effizienzsteigerung ermöglichen könnten, wenn sie separat betrachtet und verbessert werden. Eine umfassendere Bewertung, welche die individuellen Aggregate in Betracht zieht, könnte dazu beitragen, Interaktionen und Wechselwirkungen zwischen den Komponenten zu identifizieren. Effiziente Aggregate können die Leistungsfähigkeit anderer Komponenten beeinflussen, wodurch eine isolierte Gesamtbetrachtung möglicherweise nicht alle relevanten Effekte erfassen würde. Die Norm 14955-3 ist vor allem für Werkzeugmaschinen geeignet, die kontinuierlich und über das gesamte Jahr hinweg produzieren. Die Anwendung dieser Norm gestaltet sich jedoch schwieriger für Werkzeugmaschinen, die für Lehrzwecke an Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen verwendet werden. Dies liegt daran, dass die Standardzeitanteile für den Betrieb solcher Werkzeugmaschinen an der Hochschule schwer zu ermitteln sind, was die Anwendung der Norm erschwert.

4 Anwendung der ISO 14955–3 an der EMCOTURN 365MC

4.1 Aufbau des Drehbearbeitungszeitung EMCOTURN 365MC

Das CNC– Drehbearbeitungszentrum EMCOTURN 365MC ist mit einer SINUMERIK 810D Steuerung ausgestattet. Die Werkzeugmaschine verfügt über ein Verfahrenweg von 210 mm in X–Achse und 610 mm in Z–Achse, sowie eine C–Achse. Die Nennleistung beträgt 13,5 kW bei Dauerbetrieb (100%) und 17 kW bei (40%) Einschaltdauer. Die Drehzahl reicht von 0 bis 4200 Umdrehungen pro Minute. Der Spindeldurchlass beträgt 65 mm. Der Werkzeugrevolver umfasst 12 Werkzeuge mit einem VDI–Zylinderschaft von 30 mm, wobei alle Werkzeuge angetrieben werden können. Die Werkzeugmaschine nutzt die Technik der Minimalmengenschmierung. Auch besitzt die Werkzeugmaschine ein Rückgewinnungssystem beim Bremsen der Arbeitsspindel.

4.2 Allgemeine Informationen

Tabelle 1: Allgemeine Information im Überblick

Information	Beschreibung
Standort	HAW Hamburg, Berliner Tor 21, 20099 Hamburg
Verantwortliche Person	Serkan Özdemir
Hersteller/ Modell/ Seriennummer der Werkzeugmaschine	CNC– Drehbearbeitungszentrum EMCOTURN 365 MC
Systemgrenze	Kein Referenzszenario vorhanden
Nennleistung	13,5 kW (100%) und 17 kW (40%) Einschaltdauer
Temperatur/ Luftfeuchtigkeit während der Messung	Durchschnittlich (18 °C)
Datum und Uhrzeit	20,06,2023/ 11:00 – 13:00 Uhr

4.3 Messgerät

Zum Messen der Stromstärke an der Werkzeugmaschine steht das Multimeter Modell 367 FC der Firma Fluke zur Verfügung. Das Multimeter nutzt das magnetische Feld zu Messung der Stromstärke, wodurch es sich um eine indirekte Messmethode handelt. In der (Abb. 13) ist das Messgerät dargestellt. Im ersten Schritt wird die Zange geöffnet und das zu untersuchende Kabel, in diesem Fall die Stromzufuhr Leitung eingeschlossen. Aufgrund der indirekten Messung und der Berechnung der Stromstärke aus der Magnetstärke, ist es relevant, dass das Stromführende Kabel mittig der Zange eingeschlossen wird.



Abbildung 14: Fluke Multimeter Modell 376 FC [18]

In der Tabelle 2 ist die Auflösung, sowie die Genauigkeit des Messgerätes aufgeführt.

Tabelle 2: Allgemeine technische Angaben Fluke 376 FC Messgerät [28]

Allgemeine technische Daten	
Messbereich	0 – 999,9 A
Auflösung	0,1 A
Genauigkeit	2 % ± 5 Digits (10 – 100 Hz) 2,5 % ± 5 Digits (100 – 500 Hz)

4.4 Messungen der Betriebszustände

4.4.1 Berechnung der elektrischen Leistung

Die Ermittlung des Energieverbrauchs der Anlage erfolgt durch numerische Integration der Stromstärke über die Zeit, gemäß der Formel 4.1. Die daraus resultierende Elektrizitätsmenge wird in Coulomb [C] angegeben. Es folgt eine Beispielrechnung für den Betriebszustand OFF to ON. Um die elektrische Leistung der einzelnen Betriebszustände miteinander vergleichen zu können, wird die elektrische Leistung in den ersten 70 Sekunden berechnet und betrachtet.

$$\Delta Q = \int I(t) dt \quad \text{Gl. 4.1}$$

Näherungsweise kann die Fläche durch das Rechteckverfahren berechnet werden.

$$Q_i = \frac{i(t_i) + i(t_{i+1})}{2} \cdot 0,25 \text{ s} \quad \text{Gl. 4.2}$$

$$\Delta Q = \sum_i^{i+1} Q_i = 33,9 \text{ As} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Entsprechend ergibt sich für die elektrische Leistung:

$$W_{el} = \sqrt{3} \cdot \cos(\varphi) \cdot U \cdot \Delta Q$$

$$W_{el} = \sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 400V \cdot 33,9 \text{ As} = 19954,8 \text{ Ws} \quad \text{Gl.4.4}$$

Als letztes wird die elektrische Leistung berechnet:

$$P_{el} = \frac{W_{el}}{\Delta t} = 0,29 \text{ kW} \quad \text{Gl.4.5}$$

Versuchsdurchführung

Zunächst wurde das Fluke Messgerät mittig an die Stromzufuhr der Werkzeugmaschine eingeschlossen. (siehe Abb. 14) Anschließend wird ein zufälliges Programm gewählt und ein Standardstahl mit einer Zylinderform als Werkstück eingespannt. Als Werkzeug wird ein einfacher Drehmeißel verwendet. Im nächsten Schritt wurden alle möglichen Betriebszustände gemessen und die Werte anhand der Fluke Connect App aufgezeichnet. Dabei wurde die Stromstärke über die Zeit in 4 Hz aufgezeichnet. Der Späneförderer geht nicht mit in die energetische Betrachtung mit ein da, dieser getaktet ist und in der Versuchsdurchführung nicht zum Einsatz kam.

4.4.2 Ergebnisse der Messungen

M01 Betriebszustand OFF

In der (Abb. 15) ist der Stromverbrauch im Betriebszustand off zu sehen. Dabei wurde die Messung über einen Zeitraum von 70 Sekunden durchgeführt. Die Leistung beträgt konstant über den Zeitraum 0 A. Wie erwartet liegt der Verbrauch hier bei 0 kW.

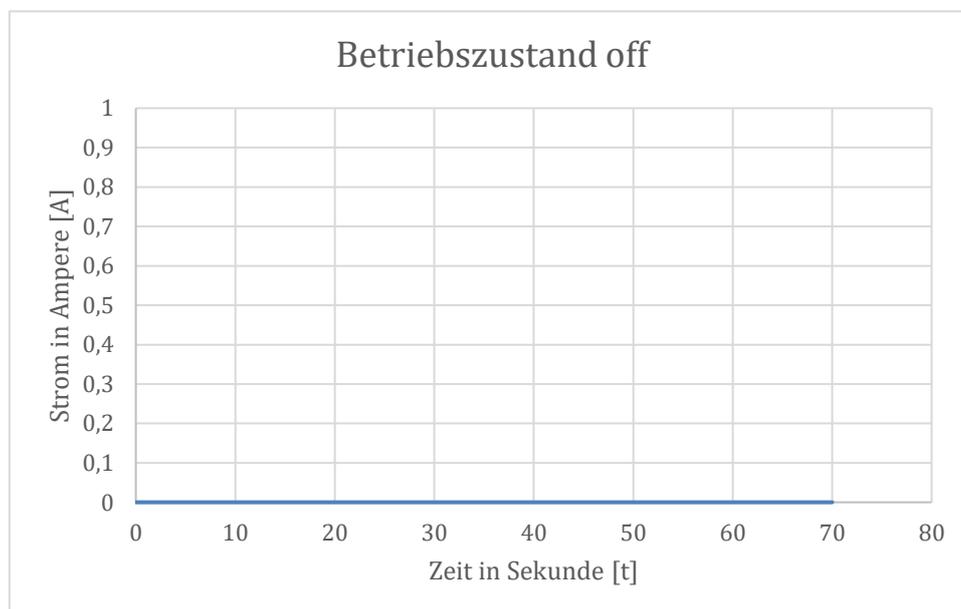


Abbildung 15: Energieverbrauch im Betriebszustand off

Tabelle 3: Messung der Leistung im Zustand ausgeschaltet

Bezeichnung	Einheit	Ergebnis
P_{OFF}	kW	0 kW (durchschnitt)
t_{OFF}	s	70 s

M02 Betriebszustand OFF zu ON

Nach dem Anschalten des Hauptantriebs, liegt ein durchschnittlicher Strom von $I = 1$ A vor. Dabei ist zu beobachten, dass zum Anlaufen des Hauptantriebs der Strom kurzzeitig auf $I_{max} = 2,15$ A steigt. In diesem Betriebszustand laufen noch keine Aggregate, die für den eigentlichen Prozess nötig sind.

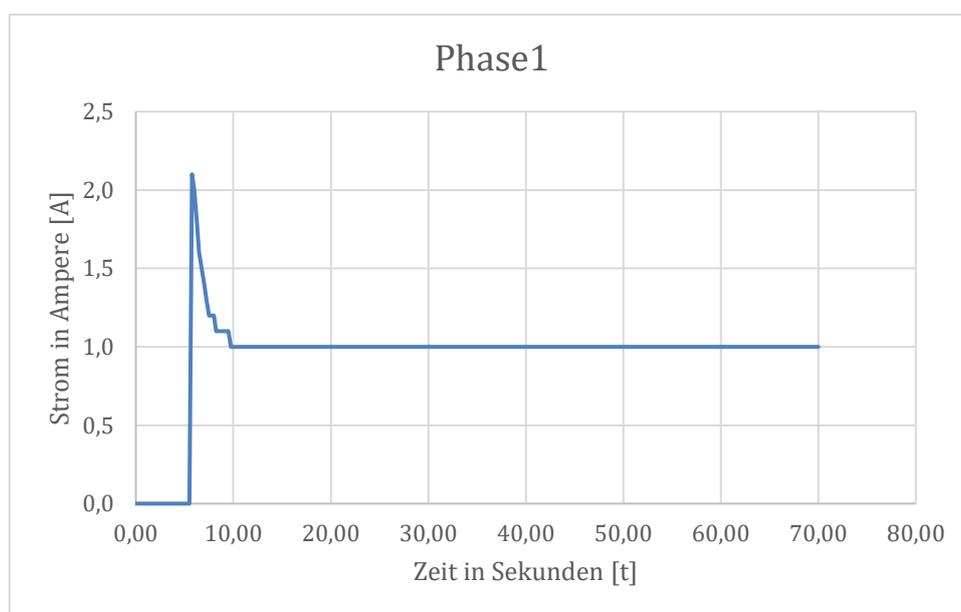


Abbildung 16: Energieverbrauch im Betriebszustand OFF to ON

Tabelle 4: Messung der Leistung Im Betriebszustand OFF to ON

Bezeichnung	Einheit	Ergebnis
$P_{OFF\ to\ ON}$	kW	0,29 kW (durchschnitt)
$t_{OFF\ to\ ON}$	s	70 s

M03 Betriebszustand STANDBY

Im Betriebszustand Standby laufen die Nebenaggregate wie Hydraulik, Kühlungssystem, Kühlmittelanlage und weitere Hilfsaggregate wie z.B. die Elektronik. Das Auftreten der Stromspitzen ist für das Hochfahren von Pumpen, beispielsweise für die Kühlsysteme oder der Hydraulik, zurückzuführen.

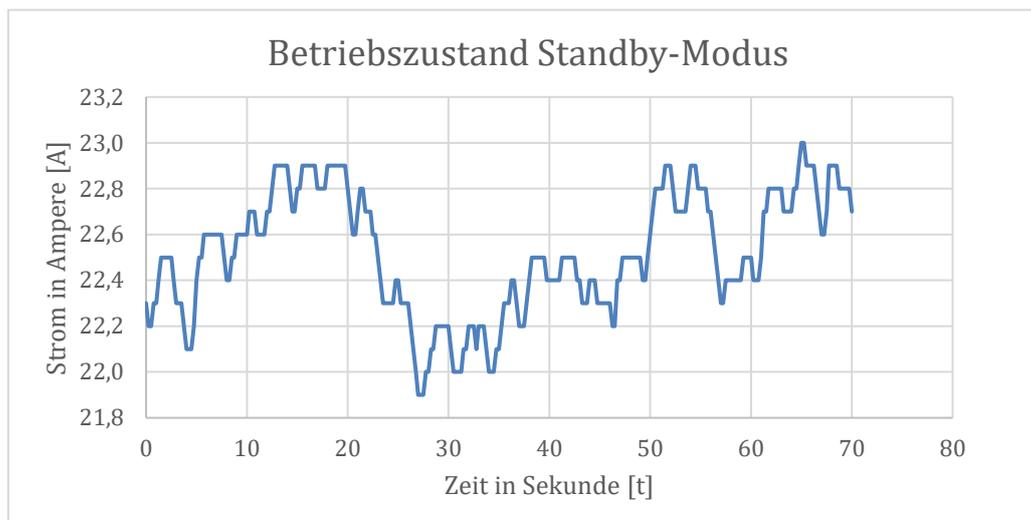


Abbildung 17: Energieverbrauch im Betriebszustand Standby

Tabelle 5: Messung der Leistung im Zustand Standby

Bezeichnung	Einheit	Ergebnis
$P_{Standby}$	kW	6,62 kW (durchschnitt)
$t_{Standby}$	s	70 s

M04 Betriebszustand SETUP

Der Betriebszustand SETUP berücksichtigt den Zustand, wo alle Aggregate warmgelaufen sind. Aufgrund dessen, dass sich in diesem Fall die elektrische Leistung nach einer bestimmten Zeit nicht geändert hat, wurde dieser Betriebszustand nicht in die Messung aufgenommen.

M05 Betriebszustand READY

In diesem Betriebszustand ist die Werkzeugmaschine betriebsbereit. Aggregate wie Hydraulik, Pneumatik und Hilfsantriebe sind eingeschaltet. Haupt- und Nebenantriebe, Absaugung und Schmierstoffsysteme stehen noch still. Hier ist gut zu erkennen, dass der Verbrauch relativ konstant über der Zeit verläuft.

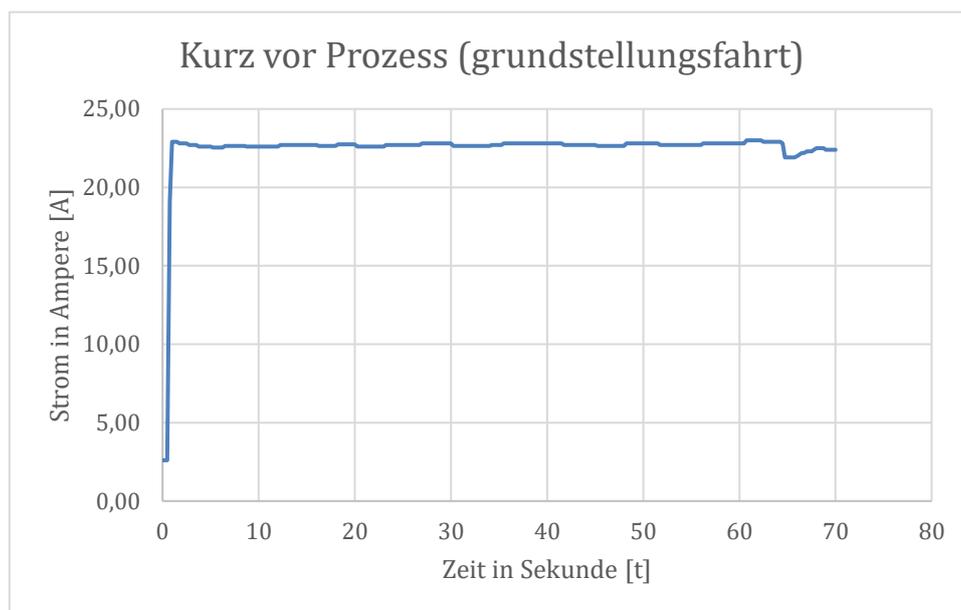


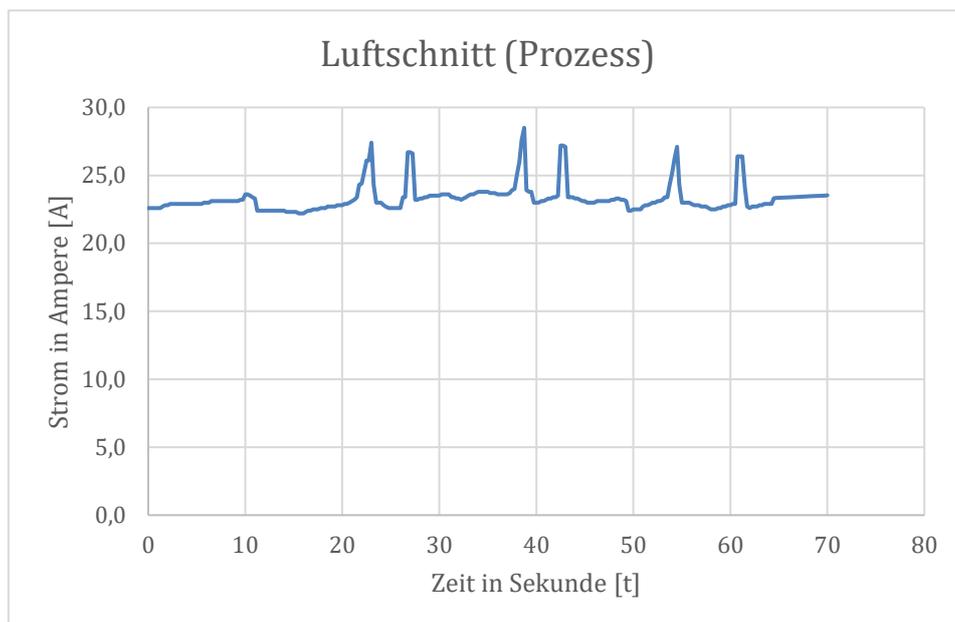
Abbildung 18: Energieverbrauch im Betriebszustand Kurz vor Prozess

Tabelle 6: Messung der Leistung im Zustand Ready

Bezeichnung	Einheit	Ergebnis
P_{Ready}	kW	6,64 kW (durchschnitt)
t_{Ready}	s	70 s

M06 Betriebszustand PROCESSING (Luftschnitt)

Hier wurde der Prozess gefahren, ohne dass die Prozesskräfte mit betrachtet werden. Sprich, es kam zu keinen Spanabtrag. Hier sind gut die Stromspitzen zu erkennen, welche auf das Beschleunigen der Hautspindel zurückzuführen sind. Auch die Beschleunigung der Vorschubachse führt zu Stromspitzen. Vergleicht man die (Abb. 17) mit der (Abb. 19) lässt sich schlussfolgern, dass im Vergleich zum Standby- Modus der Bearbeitungsvorgang den größten Energieverbrauch hat.



*Abbildung 19: Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess
(Luftschnitt)*

Tabelle 7: Messung der Leistung im Zustand Luftschnitt (Prozess)

Bezeichnung	Einheit	Ergebnis
$P_{\text{Prozess(Luftschnitt)}}$	kW	6,7 kW (durchschnitt)
$t_{\text{Prozess(Luftschnitt)}}$	s	70 s

M06 Betriebszustand PROCESSING

Erneut wird der Betriebszustand PROCESSING betrachtet. Hier werden die Prozesskräfte betrachtet. Es kommt zu einer Spanabtrag. Im Vergleich zum Luftschnitt ist auch zu erkennen, dass der maximale Strom höher ist als wie im Luftschnitt.

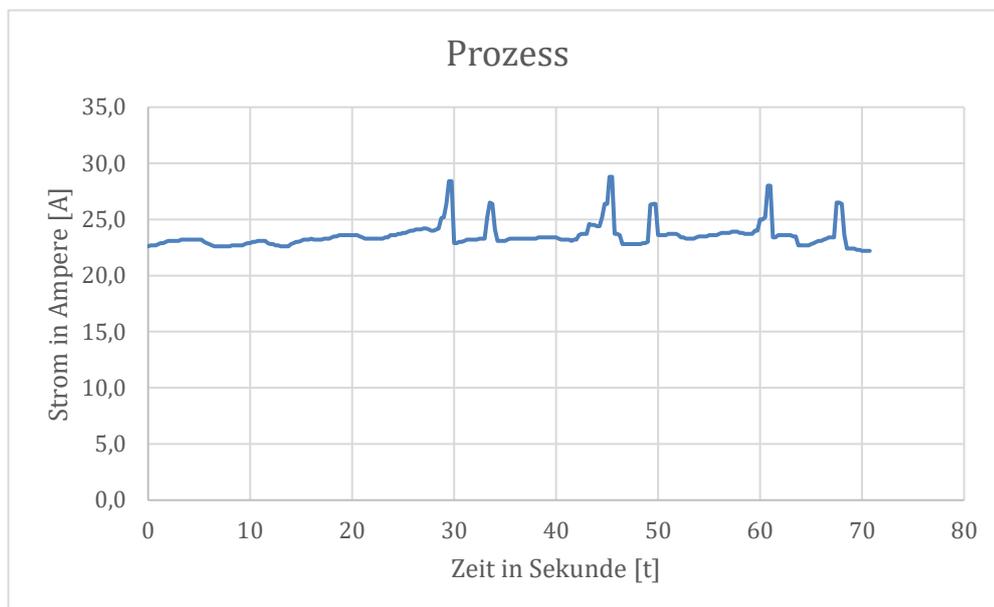


Abbildung 20: Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess

Tabelle 8: Messung der Leistung im Zustand Prozess

Bezeichnung	Einheit	Ergebnis
P_{Prozess}	kW	7 kW (durchschnitt)
t_{Prozess}	s	70 s

M07 Betriebszustand EMERGENCY STOP

Die Messung für den Betriebszustand EMERGENCY STOP wurde aus Sicherheitsgründen nicht durchgeführt, da eine Aktivierung des Not-Aus-Systems in einer laufenden Werkzeugmaschine unvorhersehbare Folgen haben könnte, wie z.B. beschädigte Teile oder Gefahren für das Bedienpersonal.

4.5 Auswertung

In der (Tabelle 9) werden nochmal alle Ergebnisse zusammenfassend aufgelistet.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Messwerte

Bezeichnung	Einheit	Wert	Beschreibung
P_{OFF}	kW	0	Durchschnittliche Leistung, während die WZM ausgeschaltet ist
t_{OFF}	s	70	Aufgenommene Messdauer
$P_{OFF\ to\ ON}$	kW	0,62	Durchschnittliche Leistung, während dem Zustand OFF to ON
$t_{OFF\ to\ ON}$	s	70	Aufgenommene Messdauer
$P_{Standby}$	kW	6,62	Durchschnittliche Leistung, während dem Zustand STANDBY
$t_{Standby}$	s	70	Aufgenommene Messdauer
P_{SETUP}	kW	/	/
t_{SETUP}	s	/	/
P_{READY}	kW	6,64	Durchschnittliche Leistung kurz vor Prozessstart
t_{READY}	s	70	Aufgenommene Messdauer
$P_{PROCESSING}$	kW	7	Durchschnittliche Leistung während des Prozesses
$t_{PROCESSING}$	s	70	Aufgenommene Messdauer
P_{ESTOP}	kW	/	/
t_{ESTOP}	s	/	/

In der (Tabelle 10) werden für die jeweiligen Betriebszustände die geschätzte Energie berechnet, die es in einem Jahr verbraucht. Es wurden die Standartzeitanteile der Norm entnommen, da die individuellen Zeitanteil nicht definiert oder bekannt sind.

Tabelle 10: geschätzte Energie E pro Jahr auf der Grundlage des individuellen Zeitanteils der Betriebsdaten

	Standby	READY	PROCESSING
Anteil Pro Jahr	15%	5%	60%
Gemessene durchschnittliche Leistung in [kW]	6,62 kW	6,64 kW	7 kW
Berechnete Energie E [kWh] für ein Jahr im Betrieb	0,15*6,62kW*365*24 = 8698,7 kWh	0,05*6,64kW*365*24 = 2908,32 kWh	0,6*7kW*365*24 = 36792 kWh

$$E = (0,15 \cdot 6,62 \text{ kW} + 0,05 \cdot 6,64 \text{ kW} + 0,6 \cdot 7 \text{ kW}) \cdot (365 \cdot 24) = 42599,9 \text{ kWh}$$

Die geschätzte Energiezufuhr für ein Produktionsjahr wird mit folgender Formel berechnet:

$$E = \left(\frac{S_{OFF} \cdot P_{OFF} + S_{STANDBY} \cdot P_{STANDBY} + S_{SETUP} \cdot P_{SETUP} + S_{READY} \cdot P_{READ} + S_{PROCESSING} \cdot P_{PROCESSING} + S_{ESTOP} \cdot P_{ESTOP} + S_0 \cdot P_0}{S_{PROCESSING} \cdot P_{PROCESSING} + S_{ESTOP} \cdot P_{ESTOP} + S_0 \cdot P_0} \right) \cdot (365 \cdot 24)$$

$$E = \left(\frac{0,05 \cdot 0 \text{ kW} + 0,15 \cdot 6,62 \text{ kW} + 0,1 \cdot 0 \text{ kW} + 0,05 \cdot 6,64 \text{ kW} + 0,6 \cdot 7 \text{ kW} + 0 \cdot 0 \text{ kW} + 0 \cdot 0 \text{ kW}}{0,6 \cdot 7 \text{ kW} + 0 \cdot 0 \text{ kW} + 0 \cdot 0 \text{ kW}} \right) \cdot (365 \cdot 24)$$

$$E = 48438,42 \text{ kWh}$$

Wie in der (Tabelle. 10) zu sehen ist, ist der Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess am höchsten.

4.6 Fazit

Ziel der Messung war es, den Energieverbrauch der einzelnen Betriebszustände zu ermitteln, um so einige Maßnahmen abzuleiten, um die Werkzeugmaschine energieeffizienter zu betreiben (Siehe Abschnitt 5). Betrachtet man die Ergebnisse aus der (Tabelle 10), ist der Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess am höchsten. Gefolgt von dem Betriebszustand STANDBY und zum Schluss vom Betriebszustand READY. Wie erwartet war der größte Energiebedarf während des Prozesses. Jedoch machen die Nebenaggregate oft den größten Anteil des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen aus, wie in (Abb. 2) zu sehen ist.

Allerdings sollte beachtet werden, dass die Norm möglicherweise nicht alle spezifischen Aspekte und Anforderungen der individuellen Werkzeugmaschine oder der Nutzungsumgebung abdeckt.

Trotz einiger Einschränkungen bietet die Norm einen wertvollen Rahmen für die Bewertung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen und dient als nützliches Werkzeug für Unternehmen, um effizienzsteigernde Maßnahmen zu identifizieren und anschließend umzusetzen. Die regelmäßige Anwendung der Norm kann dazu beitragen, den Energieverbrauch zu reduzieren, Ressourcen zu schonen und die Umweltbelastung zu minimieren, wodurch Unternehmen einen positiven Beitrag leisten können. Es ist jedoch wichtig, dass die Norm kontinuierlich überarbeitet und an aktuelle technische Entwicklungen und Anforderungen angepasst wird, um ihre Relevanz und Wirksamkeit aufrechtzuerhalten.

5 Maßnahmenkatalog

Im Folgenden werden einige mögliche Optimierungsmaßnahmen mit Aufwand und Nutzen dargestellt, um die Energieeffizienz der EMCOTURN zu steigern. Für eine Optimierung der Haupt- und Nebenaggregate. (Siehe Abschnitt 2)

Regelmäßige Wartung:

Aufgrund der festgestellten Undichtigkeiten im Hydrauliksystem der Werkzeugmaschine könnte eine geeignete Maßnahme die regelmäßige Wartung sein, um die Leckagen zu identifizieren und zu beheben.

Durch die Wartung und Optimierung (Siehe Abschnitt 2.3.5) der Werkzeugmaschine, insbesondere des Hydrauliksystems, können mehrere positive Effekte erzielt werden. Durch eine Wartung und die daraus folgenden Maßnahmen kann der Verlust von Hydraulikflüssigkeit reduziert werden, was zu einer verbesserten Leistung und Effizienz des Hydrauliksystems führt. Die korrekte Funktion des Hydrauliksystems ist entscheidend für eine präzise und zuverlässige Bearbeitung, und eine rechtzeitige Behebung von Undichtigkeiten kann Ausfallzeiten minimieren und die Produktionskapazität erhöhen.

Auch eine richtig eingestellte Hydraulik sorgt für einen effizienten Einsatz der Energie, da unnötige Leckagen und Energieverluste vermieden werden. Dadurch kann der Energieverbrauch der Werkzeugmaschine reduziert werden, was zu einer Kostensparnis und einer Verringerung des ökologischen Fußabdrucks führt.

Der Aufwand für die Wartung des Hydrauliksystems hängt von der Schwere der Undichtigkeit und dem Zustand des Systems ab. In den meisten Fällen erfordert die Behebung von Undichtigkeiten in Hydrauliksystemen das Auffinden der undichten Stelle und das Austauschen defekter Dichtungen oder Komponenten. Dies kann je nach Zugänglichkeit und Komplexität des Hydrauliksystems einigermaßen zeitaufwändig sein.

Es ist wichtig zu betonen, dass der Aufwand für die Wartung und Optimierung des Hydrauliksystems gerechtfertigt ist, da es langfristig zu erheblichen Vorteilen im Bezug auf Energieeffizienz, Produktivität und Zuverlässigkeit der Werkzeugmaschine führt. Eine gut gewartet und optimierte Hydraulik trägt dazu bei, die Betriebskosten

zu senken und die Lebensdauer der Werkzeugmaschine zu verlängern.([2], S. 658–659

Standby – Modus

Der Standby-Modus ist eine vielversprechende Maßnahme zur Energieeinsparung und Reduzierung von CO₂ Ausstoß. Die Optimierung des Standby-Modus in Werkzeugmaschinen erfordert eine sorgfältige Analyse des bestehenden Standby-Verhaltens der Maschine. Dazu ist es notwendig, die Standby-Einstellungen der Steuerungssysteme zu überprüfen und zu verstehen, wie die Maschine in den Ruhezustand versetzt wird. Fachleute müssen die spezifischen Betriebsbedingungen und Anforderungen der Werkzeugmaschine berücksichtigen, um die optimale Standby-Konfiguration zu ermitteln.

Die Implementierung einer optimierten Standby Einstellung kann technische Anpassungen an der Steuerungssoftware und den Schnittstellen erfordern. Die Integration von Sensoren zur Erkennung von Inaktivität oder Produktionsunterbrechungen kann notwendig sein, um den Standby-Modus automatisch einzuleiten und zu verlassen. Dieser Aufwand kann von Maschine zu Maschine variieren und erfordert technische Kompetenz sowie sorgfältige Planung und Umsetzung.

Die Optimierung und Einbringung des Standby-Modus in Werkzeugmaschinen bringt vielfältige Vorteile mit sich. Der offensichtlichste Nutzen liegt in der Reduzierung des Energieverbrauchs. Eine effiziente Standby-Konfiguration sorgt dafür, dass die Maschine während der Leerlaufzeiten oder Produktionsunterbrechungen nur einen minimalen Energiebedarf hat. Dies sorgt zu einem für Einsparungen im Bereich Strom und auch die Kosten für den Betreiber senken sich.

Ein weitere Nutzen ist die Verlängerung der Lebensdauer der Maschine und ihrer Komponenten. Durch den optimierten Standby-Modus wird die Beanspruchung der Maschine in den Leerlaufzeiten minimiert, was zu weniger Verschleiß und Abnutzung führt. Dies können die Wartungsintervalle verlängern und die Betriebskosten insgesamt reduzieren. Auf Basis von einigen Untersuchungen und verschiedenen Studien lässt sich feststellen, dass die energetischen Einsparpotentiale, die durch eine optimierte Standby-Betriebsweise technisch möglich wären, werden nur in Maße ausgeschöpft. Die Hauptgründe dafür sind überwiegend Ängste vor eventuell auftretende

Qualitätsschwankungen, Probleme beim Wideranlauf und die Verringerung der produzierten Mengen durch verlängerte Anlauf- oder Warmlaufzeiten nach einer Pause. ([29], S. 16–20)

Abschaltstrategie

In Werkzeugmaschinen können verschiedene Abschaltzyklen und Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz genutzt werden. Einer dieser Maßnahmen ist eine Seite vorher schon beschrieben wurden (Siehe Standby-Modus). Im folgendem wird ein Beispiel einer maschinenspezifischen Abschaltstrategie vorgestellt.

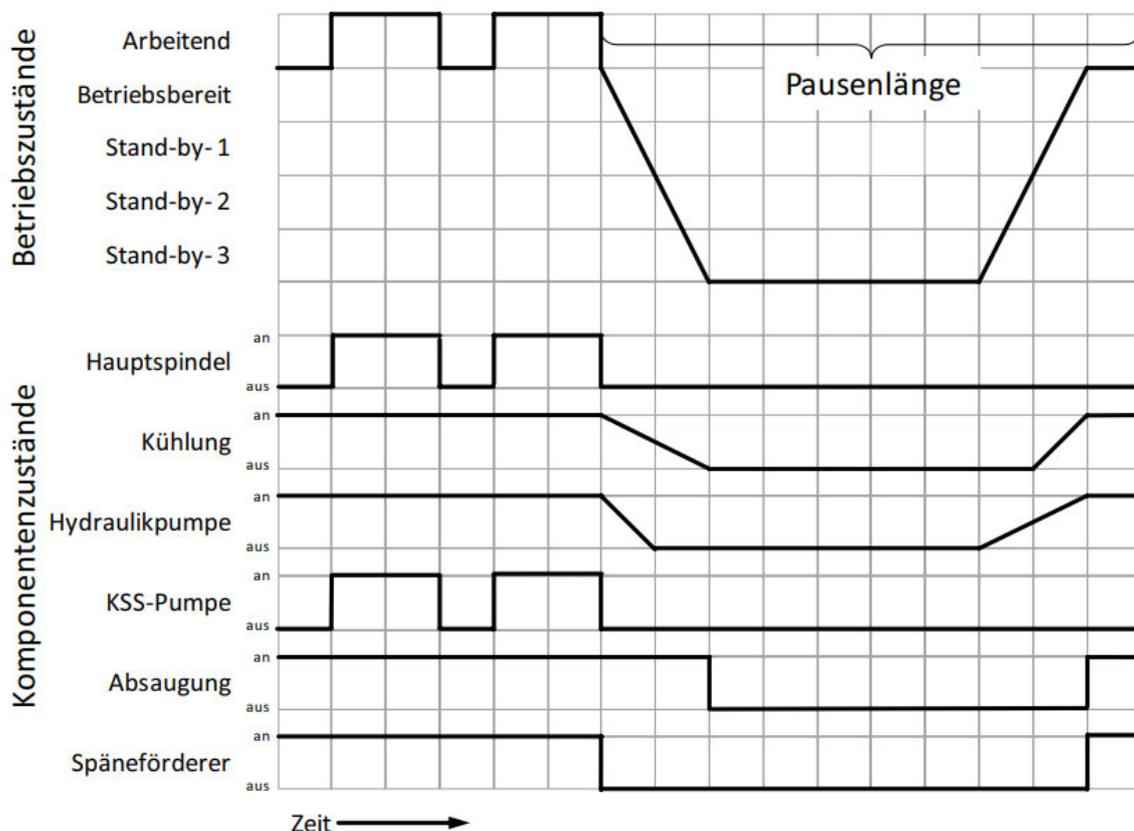


Abbildung 21: Maschinenspezifische Abschaltstrategie ([29], S.70)

Die vorliegende (Abb. 21) zeigt die Zustände der einzelnen Maschinenkomponenten in Abhängigkeit der Betriebsart der Maschine. Während der Produktions- oder Betriebsbereitschaft sind die meisten Komponenten kontinuierlich aktiviert. Einzig die Hauptspindel und die Kühlmittelpumpe folgen der Betriebsweise der Maschine. Der Standby-Manager empfängt Informationen über den Beginn und die Dauer von Pausen, wodurch die Maschine in der Lage ist, den Standby-Betrieb 3 einzunehmen.

Jedoch ist ein unmittelbarer Wechsel in diesen Betriebszustand nicht möglich, da einige Maschinenkomponenten eine Prozess- oder maschinenbedingte Nachlaufzeit einhalten müssen. Dies bedeutet, dass die Maschine auch nach Beendigung des Fertigungsprozesses für eine bestimmte Zeit gekühlt wird und das Hydraulikaggregat eine gewisse Zeit benötigt, um den Betriebsdruck zu verringern. Gleichermaßen verfügen einige Komponenten oder die Gesamte Maschine über vorgeschriebene Hochlaufzeiten, um den betriebsbereiten Zustand zu erreichen. Diese Zeiten sind in der maschinenspezifischen Abschalt- und Anstartstrategie festgelegt.

Abhängig von der aktuellen Länge der Pause wechselt die Maschine in einen anderen Standby-Modus oder in den betriebsbereiten Zustand. Als Beispiel erfolgt bei einem Zustandswechsel in die Betriebsart „Betriebsbereit“ ein automatisches Starten des Kühl- und Hydrauliksystems. Zusätzlich wird die Absaugung des Späneförderer automatisch wieder eingeschaltet. Die geschickte Steuern dieser Standby-Modi und die Berücksichtigung der Zeiten für Hoch- und Nachlauf tragen dazu bei, die Energieeffizienz der Maschine zu verbessern und den Energieverbrauch zu optimieren. ([29], S. 70)

Es folgt ein Beispiel wie eine maschinenspezifische Abschaltstrategie aussehen kann.

Im Standby-Betrieb 1 erfolgt eine gezielte Reduzierung des Druck und des Volumenstrom in der Druckerhöhungsstation des Kühlschmierstoffsystems sowie eine Drosselung der NC-Achsen.

	Schleifprozess				Leistung	Komponenten			
	t _{runterfahren}	t _{min.}	t _{hochfahren}	t _{standby}		NC-Achsen	KSS-Druckerhöhung	Hydraulikkühlung	Nebenaggregate
Arbeitend	-				15,20 kW	An	An	An	An
Betriebsbereit	-				12,20 kW	gedrosselt	An	An	An
Stand-by 1	1,0 min	1,0 min	1,0 min	3,0 min	8,60 kW	gedrosselt	gedrosselt	An	An
Stand-by 2	10,0 min	0,0 min	0,0 min	10,0 min	8,27 kW	gedrosselt	Aus	An	Aus
Stand-by 3	10,0 min	20,0 min	90,0 min	120,0 min	2,00 kW	Aus	Aus	Aus	Aus

Abbildung 22: Maschinenspezifische Abschaltstrategie ([29], S.71–72)

Dadurch wird die Leistungsaufnahme im Vergleich zum Zustand „Betriebsbereit“ um etwa 30% verringert. Die Drosselung der Druckerhöhungsstation und der NS-Achsen wird bereit bei kurzen Unterbrechungszeiten von drei Minuten oder mehr umgesetzt.

Im Standby-Betrieb 2 erfolgt das vollständige Anschalten der Druckerhöhungsstation und der Nebenaggregate wie Spindelkühlung, Transportband und Ölabscheider. Dies führt jedoch nur zu einer geringen Absenkung der Leistungsaufnahme im Vergleich zum Stand „Betriebsbereit“.

Der Standby-Betrieb 3 wird bei sehr langen Pausen eingeschaltet, wobei die Hochlaufzeit etwa 90 Minuten beträgt. Aus diesem Grund werden alle relevanten Komponenten erst ab einer Unterbrechung von 120 Minuten ausgeschaltet.

Diese differenzierten Standby- Betriebszustände ermöglichen eine effiziente Anpassung der Energieverbrauchsrate an die Dauer der Unterbrechungszeiten. Durch die gezielte Reduzierung der Leistungsaufnahme bei kürzeren Pausen und das vollständige Ausschalten von Komponenten bei längeren Pausen kann der Energieverbrauch insgesamt optimiert werden. Die präzise Definition und Anpassung der Standby-Betriebszustände basiert auf technischen Kenntnissen und detaillierten Untersuchungen, um die bestmögliche Balance zwischen Energieeinsparung und maschinenspezifischen Anforderungen zu gewährleisten. ([29], S.70–72)

Optimierung der Prozessparameter

Die gezielte Anpassung und Optimierung der Prozessparameter in Werkzeugmaschinen spielt auch eine bedeutende Rolle bei der Förderung der Energieeffizienz und der Nachhaltigkeit in der Fertigungsindustrie.

Aus einer Studie hat sich ergeben, dass die Schnitttiefe und der Vorschub pro Zahn den größten Einfluss auf den spezifischen Energiebedarf haben. Diese Ergebnisse werden von Rentsch und Heinzl gestützt, die durch eine Verdoppelung der Vorschubgeschwindigkeit den Energiebedarf um bis zu 28 bis 35 % senken konnte. ([2], S.660)

Zu einem müssen an der Werkzeugmaschine gründliche Untersuchungen und Analyse durchgeführt werden, um die optimalen Prozessparameter zu ermitteln. Dies kann den Einsatz von spezialisierten Sensoren, Messgeräten und Softwaretools beinhalten, um dem Energieverbrauch in verschiedenen Bearbeitungsszenarien zu messen und zu bewerten. Aber auch die Schulung und das Fachwissen vom Personal ist wichtig.

Optimal Prozessparameter können für verlängerte Werkzeugstandzeit sorgen. Zudem sorgt ein effizienter Bearbeitungsprozess auch für weniger Verschleiß der Werkzeuge, was zu einem geringeren Ressourcenverbrauch sorgt. ([2], S.660–662)

6 Zusammenfassung

Ziel der Bachelorarbeit war es, die DIN EN ISO 14955–3 näher zu betrachten und auf die ausgewählte Werkzeugmaschine an der HAW Hamburg anzuwenden. Dabei wurde zunächst auf den Stand der Technik von Werkzeugmaschinen im Bezug auf Energieeffizienz eingegangen und anschließend die DIN EN ISO 14955–3 zusammenfassend erklärt. Des Weiteren wurde die ISO 14955–3 angewendet und die ermittelten Ergebnisse dokumentiert und ausgewertet. Im letzten Teil wurden einige Optimierungsmaßnahmen vorgestellt, womit sich die Werkzeugmaschine optimieren lässt, um den Energieverbrauch zu senken.

7 Ausblick

Die steigende globale Nachfrage nach Energie in der Industrie führt zu erheblichen ökologischen und ökonomischen Belastungen. Die Literatur zeigt, dass die Konstruktion und der Betrieb von Werkzeugmaschinen ein erhebliches Potenzial bieten, um Energieeinsparungen im industriellen Bereich zu realisieren. Eine Analyse der Energieverteilung in einzelnen Werkzeugmaschinen verdeutlicht, dass der Gesamtenergiebedarf weit über dem Energiebedarf des eigentlichen Zerspanungsprozesses liegt. Zusätzlich ist der variable Energiebedarf, der mit der Materialbearbeitung zusammenhängt, im Vergleich zum festen Energiebedarf der Haupt- und Nebenaggregate der Werkzeugmaschine vergleichsweise gering. Vor allem Kühlsysteme, Kühlschmierstoffversorgungen und Hydraulikaggregate tragen entscheidend zum Gesamtenergiebedarf bei.

Anhand der durchgeführten Messungen ist auch zu sehen, dass die Nebenaggregate den Energieverbrauch dominieren. Jedoch liegt der größte Energieverbrauch im Betriebszustand Prozess vor. Somit sollten auch Optimierungen an der Hauptspindel erfolgen (Siehe dazu Abschnitt 2 Hauptspindel).

Trotz der genannten Potenziale, die in dieser Bachelorarbeit genannt wurden, wird in Offenen Forschungsthemen noch weiter geforscht wie beispielsweise: ([2], S.663)

- CAM-Tools zur energieeffizienten Auswahl von Prozessparametern, Trajektorienoptimierung und adaptiven Kühlstrategien inklusive Selbstoptimierung auf Basis von Prozessdaten

- Weitere Erforschung von Minimalmengenschmierung und nahezu trockener Bearbeitung für einen breiten Einsatz in der Fertigungsindustrie.
- Ermittlung der tatsächlichen benötigten Kühlschmierstoffmenge und -drücke für bedarfsgerechte Versorgungsstrategien.
- Untersuchung von Prozesszusammenhänge, z.B. für Produktivität und Werkzeugverschleiß, Nebenzeiten und thermische Stabilität, Temperaturaufbau und Bearbeitungsgenauigkeit.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Freudenberg Filtration Technologies (2023) Energie sparen – aber wie? <https://www.freudenberg-filter.com/de/world-of-industrial/energieeffizienz/>. Accessed 27 Apr 2023
- [2] Denkena B, Abele E, Brecher C et al. (2020) Energy efficient machine tools. *CIRP Annals* 69:646–667. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.05.008>
- [3] (2023) ISO 14955-1 – 2017-11 – Beuth.de. <https://www.beuth.de/de/norm/iso-14955-1/282481423>. Accessed 27 Apr 2023
- [4] (2023) EWOTeK. Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb – PDF Kostenfreier Download. <https://docplayer.org/56642027-Ewotek-effizienzsteigerung-von-werkzeugmaschinen-durch-optimierung-der-technologien-zum-komponentenbetrieb.html>. Accessed 19 Jul 2023
- [5] Salgado DR, Alonso FJ (2008) Optimal machine tool spindle drive gearbox design. *Int J Adv Manuf Technol* 37:851–860. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1028-6>
- [6] Abele E, Sielaff T, Schiffler A et al. (2011) Analyzing Energy Consumption of Machine Tool Spindle Units and Identification of Potential for Improvements of Efficiency. In: Hesselbach J, Herrmann C (eds) *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 280–285
- [7] Abele E, Rothenbücher S, Schiffler A (2007) Digitally controlled output filters for improvement of temperature behavior of machine tool main spindle drives. *Prod Eng Res Devel* 1:219–226. <https://doi.org/10.1007/s11740-007-0021-0>
- [8] Triebe MJ, Mendis GP, Zhao F et al. (2018) Understanding Energy Consumption in a Machine Tool through Energy Mapping. *Procedia CIRP* 69:259–264. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.041>
- [9] Heyers C (2014) *Energieeffizienter Betrieb von Asynchron-Hauptspindelantrieben in Werkzeugmaschinen*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2013, 1. Aufl. *Werkzeugmaschinen*, vol 2013,33. Apprimus Verlag, Aachen

-
- [10] Lv J, Tang R, Tang W et al. (2017) An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools. *Journal of Cleaner Production* 143:794–803. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.045>
- [11] Klocke F (2017) *Fertigungsverfahren 2*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg
- [12] Madanchi N, Winter M, Thiede S et al. (2017) Energy Efficient Cutting Fluid Supply: The Impact of Nozzle Design. *Procedia CIRP* 61:564–569. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.192>
- [13] Mayr J, Jedrzejewski J, Uhlmann E et al. (2012) Thermal issues in machine tools. *CIRP Annals* 61:771–791. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.008>
- [14] Christian Brecher, Stephan Bäuml, David Jasper, and Johannes Trieb Energy Efficient Cooling Systems for Machine Tools
- [15] Mori K, Bergmann B, Kono D et al. (2019) Energy efficiency improvement of machine tool spindle cooling system with on-off control. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 25:14–21. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.04.003>
- [16] Toshiba– Klima Invertertechnologie
- [17] Zhou L, Li J, Li F et al. (2016) Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. *Journal of Cleaner Production* 112:3721–3734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.093>
- [18] Import M (2012) Verbrauch auf Bedarf reduziert. *Industrieanzeiger*
- [19] Okwudire C, Rodgers J (2013) Design and control of a novel hybrid feed drive for high performance and energy efficient machining. *CIRP Annals* 62:391–394. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.139>
- [20] Peng T, Xu X (2014) Energy-efficient machining systems: a critical review. *Int J Adv Manuf Technol* 72:1389–1406. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5756-0>
- [21] Seliger G (2012) *Sustainable Manufacturing*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg

-
- [22] Brecher C, Jasper D, Fey M (2017) Analysis of new, energy-efficient hydraulic unit for machine tools. *Int J of Precis Eng and Manuf.–Green Tech* 4:5-11. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0001-6>
- [23] Hülsemeyer L Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen und bedarfsgerechter Betrieb am Beispiel der inneren Kühlschmierstoffzufuhr. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
- [24] Prof. Dr.–Ing. Eberhard Abele, Dipl.–Ing. Tilo Sielaff, Dipl.–Wirtsch.–Ing. Martin Beck (2013) Schlussbericht zum Projekt MaxiEM: Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen
- [25] Saidur R, Rahim NA, Hasanuzzaman M (2010) A review on compressed-air energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:1135-1153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.013>
- [26] Wegener K, Mayr J, Merklein M et al. (2017) Fluid elements in machine tools. *CIRP Annals* 66:611-634. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.008>
- [27] (VDI-Buch) Prof. Dr.–Ing. Dr.–Ing. E. h. Manfred Weck (auth.) – Werkzeugmaschinen–Fertigungssysteme 2_ Konstruktion und Berechnung–Springer Berlin Heidelberg (2002)
- [28] Fluke 370 FC Series True-rms Wireless AC/DC Clamp Meters
- [29] Prof. Dr.–ing. Jens Hesselbach Standbymodus: Entwicklung eines Stand-by-Managers zur energieeffizienten Produktionssteuerung:1-146

9 Erklärung zu selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

<u>Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit</u>		
Hiermit versichere ich,		
Name:	_____	
Vorname:	_____	
dass ich die vorliegende -bitte auswählen- bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:		
ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.		
<i>- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -</i>		
Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:		
_____	_____	_____
Ort	Datum	Unterschrift im Original