

Leitfaden für Energieaudits für Werkzeugmaschinen

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie, Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autoren: Mag. DI Konstantin Kulterer, Lorenz Jüttner (Österreichische Energieagentur)
Wien, 2022

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind
ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger
Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des BMK und der Autorin/des Autors
ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin
oder des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte
keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an
eebetriebe@energyagency.at.

Inhalt

1 Beschreibung Werkzeugmaschinen.....	5
1.1 Definitionen	5
1.1.1 Werkzeugmaschine.....	5
1.1.2 Werkzeugmaschinen-Komponente	6
1.1.3 Aufgaben einer Werkzeugmaschine.....	6
1.1.4 Betriebsmodus.....	6
1.1.5 Betriebszustand	7
1.2 Komponenten	8
1.3 Energieverbrauchsanteile	11
2 Durchführung Energieaudit – Datenanalyse	19
2.1 Schritt 1: Vorauswahl der Anlagen	19
2.2 Schritt 2: Erfassung der vorhandenen Informationen.....	20
2.3 Durchführung von Messungen	23
3 Einsparmaßnahmen	26
3.1 Durchführung beziehungsweise Installation von Messungen.....	26
3.2 Optimierung des Abschaltmanagements (Stand-by-Manager).....	28
3.3 Einstellung der Schneidparameter, Reduktion der Neben- und Bearbeitungszeiten, Werkzeugoptimierung.....	30
3.3.1 Einstellung der Schneidparameter	30
3.3.2 Reduktion der Neben- und Bearbeitungszeiten	31
3.3.3 Werkzeugoptimierung	33
3.4 Optimierung des Hydrauliksystems.....	35
3.4.1 Pumpenregelung.....	35
3.4.2 Optimierung von Systemen mit Speichern.....	36
3.4.3 Energetische Bewertung.....	38
3.5 Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung.....	40
3.5.1 Hochdruckpumpen	41
3.5.2 Optimierung Niederdruckpumpen	48
3.5.3 Effizienz bei der Kühlschmierstoffversorgung.....	49
3.6 Optimierung des Kühlsystems	50
3.6.1 Optimierung der Regelung und Vermeidung von Heißgas-Bypass	50
3.6.2 Nutzung der Abwärme.....	54
3.7 Weitere Einsparmaßnahmen.....	54
3.7.1 Späneförderer	54
3.7.2 Ölnebelabscheider und Absauganlagen	55

3.7.3 Druckluft	56
4 Über klimaaktiv	57
Kontakt	57
Tabellenverzeichnis.....	58
Abbildungsverzeichnis.....	59
Formelverzeichnis	60
Literaturverzeichnis	61
Abkürzungen.....	65
Anhang	66

1 Beschreibung Werkzeugmaschinen

Dieser Leitfaden soll Energieauditor:innen die energetische Analyse von Werkzeugmaschinen in der spanabhebenden Fertigung erleichtern und die wichtigsten Einsparmaßnahmen vorstellen.

Werkzeugmaschinen verursachen circa 5 bis 10 % des industriellen Stromverbrauchs. 70 bis 80 % des deutschen Marktes für Werkzeugmaschinen macht die spanabhebende Fertigung aus. Weltweit sind diese Maschinen für 1 bis 3 % des gesamten weltweiten Stromverbrauchs verantwortlich (Denkena et alii, 2020).

Eine Untersuchung von 32 Werkzeugmaschinen in Deutschland zeigte, dass 26 Maschinen Potenzial zur Verbesserung des Abschaltmanagements hatten. Bei 15 weiteren Maschinen bestand Optimierungspotenzial in der Verbesserung des Kühlsystems. Es folgten Maßnahmen im Bereich Hydraulik und Kühlschmierstoffversorgung (KSS-Versorgung) bei 14 beziehungsweise 11 Werkzeugmaschinen. (Petruschke et alii, 2020)

Dieses Kapitel enthält Definitionen für wichtige Begriffe im Bereich spanabhebende Fertigung, erläutert die wichtigsten Komponenten einer Werkzeugmaschine und gibt im Anschluss einige Informationen zum Energieverbrauch dieser Komponenten.

1.1 Definitionen

Im Folgenden werden wichtige Begriffe im Zusammenhang mit Werkzeugmaschinen erklärt.

1.1.1 Werkzeugmaschine

Werkzeugmaschinen sind feststehende (das heißt nicht bewegliche) und in der Regel durch Strom sowie Druckluft angetriebene mechanische Vorrichtungen, die typischerweise zur Bearbeitung von Werkstücken durch selektives Entfernen/Zufügen von Material oder mechanische Verformung verwendet werden (Neugebauer, 2012; Internationale Organisation für Normung – ISO 14955, 2017). Diese Bearbeitung wird durch eine mechanisch angetriebene, geführte Relativbewegung zwischen Werkzeug und

Werkstück realisiert. Werkzeugmaschinen können mechanisch, von Menschen oder durch Computer gesteuert sein. Sie können über eine Reihe von Peripheriegeräten verfügen, die für ihre Kühlung/Heizung, die Prozesskonditionierung, die Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen (mit Ausnahme der Werkstückzuführung), die Handhabung von Wertstoffen und Abfällen sowie andere Aufgaben im Zusammenhang mit ihrer Haupttätigkeit genutzt werden. Einige (spanabhebende) Werkzeugmaschinen sind beispielsweise Bohr-, Dreh- und Fräsmaschinen (Neugebauer, 2012; ISO 14955, 2017).

1.1.2 Werkzeugmaschinen-Komponente

Unter Werkzeugmaschinen-Komponente ist die mechanische, elektrische, hydraulische oder pneumatische Baugruppe einer Werkzeugmaschine oder eine Kombination aus den aufgezählten Baugruppen (ISO 14955, 2017) zu verstehen. Auf die Komponenten von Werkzeugmaschinen wird in Kapitel 1.2 näher eingegangen.

1.1.3 Aufgaben einer Werkzeugmaschine

Die Aufgabe einer Werkzeugmaschine besteht in erster Linie darin, ein Bearbeitungsverfahren durch die kontrollierte Relativbewegung von Werkzeug und Werkstück durchzuführen (Neugebauer, 2012; ISO 14955, 2017). Um den gewünschten Arbeitsprozess bestmöglich zu realisieren, kann die Maschine – abhängig vom Typ – zusätzlich folgende weitere Funktionen aufweisen: Schmierung, Wärmezufuhr/abfuhr, Prozesskonditionierung, Werkstückhandhabung, Werkzeugtausch sowie Wertstoff- und Abfallabscheidung. Die Funktion wird dabei von einer oder einer Kombination verschiedener Komponenten ausgeführt. Anhand der notwendigen Funktionen der Maschinen kann man auf die dafür notwendigen Komponenten und den einhergehenden Energiebedarf zurückschließen (Neugebauer, 2012; ISO 14955, 2017).

1.1.4 Betriebsmodus

Der Betriebsmodus beschreibt die Art, wie eine Maschine betrieben wird. Der Betriebsmodus der Funktionen liegt den Sicherheitsbestimmungen der Werkzeugmaschine zugrunde. Eine Werkzeugmaschine kann zum Beispiel im manuellen, automatischen oder Rüstmodus betrieben werden sowie im Dauer-, Kurzzeit- oder periodischen Betrieb ausgeführt werden (Fischer, Linse, 2012; ISO 14955, 2017).

1.1.5 Betriebszustand

Neben „Ein“ und „Aus“ kann eine Arbeitsmaschine und ihre Komponenten weitere Betriebszustände annehmen, die den aktuellen Arbeitsstatus der Maschine widerspiegeln. Weitere Betriebszustände können zum Beispiel „Stand-by“, „Vorwärmen“, „Betriebsbereit“, „In Bearbeitung“ und „Halten“ umfassen. Abhängig vom Betriebszustand und auszuführenden Bearbeitungsverfahren wird ein Betriebsmodus sowie eine Maschinenfunktion ausgewählt (ISO 14955-1, 2017). Die wichtigsten Betriebszustände werden in nachfolgender Tabelle kurz erklärt:

Tabelle 1: Beschreibung der unterschiedlichen Energiezustände laut Verband Deutsche Maschinen- und Anlagenbau

Energiezustände	Beschreibung
Aus (Off)	Der Hauptschalter der Maschine ist ausgeschaltet, die Steuerung steht unter Spannung.
Stand-by	Statischer Zustand: Energie- und Medienverbräuche sind so weit abgesenkt, dass nicht sofort ein Teil bearbeitet werden kann, sondern nur nach Warmfahren. Die Maschine wird über Signal oder Bediener:in aktiviert, wenn bekannt ist, zu welchem Zeitpunkt sie wieder Teile fertigen muss.
Betriebsbereit (Operational)	Die Maschine kann ohne Wartezeit das nächste Werkstück bearbeiten, befindet sich aber in einem (von mehreren möglichen) Energiesparprofilen.
Bearbeitung (Working)	Werkstücke werden bearbeitet.
Powering up/down	Übergang von Stand-by zu Working (und zurück)

Quelle: VDMA 34179

1.2 Komponenten

Werkzeugmaschinen setzen sich aus einer Reihe verschiedener Haupt- und Peripheriebauteilen zusammen. Die nachfolgende Tabelle soll einen Überblick über typische Komponenten einer Werkzeugmaschine sowie deren Funktion und Ausführung verschaffen.

Tabelle 2: Auflistung und Beschreibung der Komponenten einer Werkzeugmaschine

Komponente	Beschreibung
Hauptantrieb	Auch „Spindelmotor“; liefert den rotatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Fräsmaschinen) beziehungsweise translatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Hobelmaschinen) der Arbeitsspindel und erzeugt somit die Schnittbewegung (Hirsch, 2012). Bei translatorischen Antrieben werden meist Drehstrommotoren verbaut, deren Drehzahl über die Wechselstromfrequenz gesteuert wird. Für schwere Bearbeitung mit hohem Drehmoment werden auch Gleichstrommotoren verwendet. Bei translatorischen Antrieben werden meist mechanische und hydraulische Antriebe verwendet, aber auch elektromechanische Antriebe in Verbindung mit einem Getriebe (Neugebauer, 2012).
Nebenantrieb	Auch „Vorschubantrieb“; liefert die Vorschubbewegung, um die Spanabnahme aufrechtzuerhalten (Hirsch, 2012).
Hilfsantriebe	Sind Antriebe, die nur indirekt mit dem Bearbeitungsverfahren in Verbindung stehen – Kühlmittelpumpe, Hydraulikantrieb, Positionierantriebe (X-, Y-, Z-Achsen-Motoren), Werkzeug- und Werkstückwechsel (Hirsch, 2012).
X-, Y-, Z-Achsen-Motoren	Servomotoren ohne Vorschub zur Positionierung von Werkstück und Werkzeug
Arbeitsspindel	Dient zur Realisierung der Drehbewegung beziehungsweise Schnittbewegung als Teil der Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug. Es wird zwischen Werkstückspindeln (zum Beispiel Drehmaschinen) und Werkzeugspindeln (zum Beispiel Bohrmaschinen) unterschieden. Die Arbeitsspindel steht in direkter Verbindung mit Werkstück beziehungsweise Werkzeug (Bahmann, 2013; Hirsch 2012).
Führung	Die Führung dient dazu, entweder nur die Verschiebung des Werkstücks entlang einer Achse (Geradführung) oder nur die Drehung um eine Achse (Rundführung) zu erlauben und die restlichen Freiheitsgrade zu binden. Führungen können weiter nach der Querschnittsform und der Art der Führungsflächentrennung unterteilt werden sowie danach, ob sie während der Bearbeitung feststehen (Verstellführung) oder eine Vorschub- oder Schnittbewegung durchführen (Bewegungsführung); (Hirsch, 2012).

Komponente	Beschreibung
Hauptantrieb	Auch „Spindelmotor“; liefert den rotatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Fräsmaschinen) beziehungsweise translatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Hobelmaschinen) der Arbeitsspindel und erzeugt somit die Schnittbewegung (Hirsch, 2012). Bei translatorischen Antrieben werden meist Drehstrommotoren verbaut, deren Drehzahl über die Wechselstromfrequenz gesteuert wird. Für schwere Bearbeitung mit hohem Drehmoment werden auch Gleichstrommotoren verwendet. Bei translatorischen Antrieben werden meist mechanische und hydraulische Antriebe verwendet, aber auch elektromechanische Antriebe in Verbindung mit einem Getriebe (Neugebauer, 2012).
Werkzeug	Ist jener Teil der Werkzeugmaschine, der direkt mit dem Werkstück in Kontakt steht und den Bearbeitungsprozess ausführt – zum Beispiel Fräser, Bohrer, Drehmeißel (Hirsch, 2012).
Werkzeugaufnahme	Stellt die Schnittstelle zwischen Werkzeug und Spindel dar (Neugebauer, 2012).
Werkzeugwechsler	Ermöglicht das automatische Einwechseln von Werkzeugen aus dem Werkzeugspeicher. Das Einwechseln kann über eine Zusatzeinrichtung wie zum Beispiel einen Doppelarmgreifer erfolgen oder durch ein „Pick-up-Verfahren“ realisiert werden, bei welchem eine kombinierte Bewegung von Maschinenachsen und dem Werkzeugmagazin ausgeführt wird (Hirsch, 2012).
Werkzeugspeicher	Dient zur Lagerung der Werkzeuge. Der Speicher kann zum Beispiel in Form von Ketten-, Revolver- oder Kassettenmagazinen verbaut sein. (Hirsch, 2012; Bahmann, 2013; Neugebauer, 2012).
Werkstücktisch	Dient zur Ablage des Werkstückes. Das Werkstück kann auf dem Werkstücktisch befestigt werden und dieser ist gegebenenfalls kippbar oder auf einer Führung gelagert (Neugebauer, 2012).
Lager	Je nach Anwendung kann die Lagerung der Arbeitsspindel variieren. Circa 90 % der Hauptspindellagerungen werden mit Wälzlagerkonstruktionen ausgeführt. Sind jedoch geforderte Eigenschaften wie Genauigkeit, Laufruhe, Dämpfung oder Drehzahl mit Wälzlagern nicht erreichbar, wird auf hydrodynamische, hydrostatische oder aerostatische Gleitlager oder aber auf (Elektro-)Magnetlager zurückgegriffen (Hirsch, 2012).
Getriebe	Die Verwendung von Getrieben ermöglicht einerseits die Anpassung von Drehzahl und Moment der Hauptspindel sowie gegebenenfalls die Umwandlung einer rotatorischen Bewegung in eine translatorische (Hirsch, 2012).
Kühlschmierstoffdüse	Durch die teils starke Wärmeentwicklung muss dem Werkzeug oder Werkstück gegebenenfalls Kühlschmierstoff zugeführt werden. Durch die Zufuhr von Kühlschmierstoff wird zudem die Reibung vermindert und der Transport der Späne unterstützt (Pauksch, 2008).

Komponente	Beschreibung
Hauptantrieb	Auch „Spindelmotor“; liefert den rotatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Fräsmaschinen) beziehungsweise translatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Hobelmaschinen) der Arbeitsspindel und erzeugt somit die Schnittbewegung (Hirsch, 2012). Bei translatorischen Antrieben werden meist Drehstrommotoren verbaut, deren Drehzahl über die Wechselstromfrequenz gesteuert wird. Für schwere Bearbeitung mit hohem Drehmoment werden auch Gleichstrommotoren verwendet. Bei translatorischen Antrieben werden meist mechanische und hydraulische Antriebe verwendet, aber auch elektromechanische Antriebe in Verbindung mit einem Getriebe (Neugebauer, 2012).
Ölnebelabsauger	Da der Kühlschmierstoff während des Bearbeitungsprozesses in der Luft verteilt wird, ist es notwendig, die in der Luft befindlichen Schmierstofftropfen aus dem Arbeitsbereich zu entfernen. Ölnebelabsauganlagen (als Einzelplatz- oder Zentralanlage), bestehend aus Absauganlagen und Ölnebelabscheidern, werden zu diesem Zweck eingesetzt. (Denkena et alii, 2020)
Skimmer (Ölnebelabscheider)	Entfernt Öle und Verschmutzungen aus Kühlschmierstoffen und anderen Flüssigkeiten. Durch einen nachgeschalteten Filter kann das Schmiermittel wiederaufbereitet werden (Spanntech, 2022).
Kühlsystem	Durch die Reibungsenergie des Bearbeitungsprozesses entsteht Wärme. Da diese Energie negative Einflüsse auf Lager- und Werkstückeigenschaften sowie die Lebensdauer von Werkzeug und Maschine haben kann, ist eine aktive Kühlung notwendig. Daher wird ein Kühlsystem verwendet, um eine Reihe an Komponenten zu kühlen, wie zum Beispiel Arbeitsspindel, Antriebe, Hydraulik, Gehäuse, Steuerkasten und das Kühlschmiermittel (Petruschke, 2020; Denkena et alii, 2020). Die Kühlung kann über eine Reihe verschiedener Methoden realisiert werden, wie Luftkühlung, Kaltwasserkühlung, Kältekompressoren und die Verwendung von Kühlschmiermittel. Das Kühlsystem ist in den meisten Fällen für den größten Anteil des Energieverbrauchs einer Werkzeugmaschine verantwortlich (Denkena et alii, 2020).
Hydraulik	Allgemein wird in einer hydraulischen Anlage über die Ölpumpe mechanische Energie in das System eingebracht und in hydraulische umgeformt. In einem Hydraulikmotor wird die hydraulische Energie wieder in mechanische Energie zurückgewandelt (Vogel, ohne Jahresangabe). In einer Werkzeugmaschine ermöglichen hydraulische Bauteile eine Reihe verschiedener Funktionen. Diese umfassen Werkzeugwechsel, Werkstückeinspannung, Gewichtskompensation und Druckbereitstellung für hydrostatische Lager und Führungen (Denkena et alii, 2020).
Späneförderer	Dient zur Abtrennung und Sammlung der beim Prozess entstehenden Späne (Denkena et alii, 2020).
Sicherheitsbauteile	Um die Arbeitssicherheit des Bedienungspersonals zu gewährleisten, sind je nach Betriebsart bestimmte Schutzeinrichtungen zu realisieren. Neben Not-Aus-Schalter, Überlastsicherungen und Steuerungs-Sicherheitseinrichtungen

Komponente	Beschreibung
Hauptantrieb	Auch „Spindelmotor“; liefert den rotatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Fräsmaschinen) beziehungsweise translatorischen Antrieb (zum Beispiel bei Hobelmaschinen) der Arbeitsspindel und erzeugt somit die Schnittbewegung (Hirsch, 2012). Bei translatorischen Antrieben werden meist Drehstrommotoren verbaut, deren Drehzahl über die Wechselstromfrequenz gesteuert wird. Für schwere Bearbeitung mit hohem Drehmoment werden auch Gleichstrommotoren verwendet. Bei translatorischen Antrieben werden meist mechanische und hydraulische Antriebe verwendet, aber auch elektromechanische Antriebe in Verbindung mit einem Getriebe (Neugebauer, 2012).
	werden – um den Zugriff in den Arbeitsraum während der Bearbeitung einzuschränken – Gitter, Lichtschranken und andere Sperrmechanismen verbaut, die teils direkt mit der Steuerung des Antriebs gekoppelt sind (Deutsche Industrienorm – DIN EN 74; Hirsch, 2012).
Steuerung	Ist für die gerichtete Beeinflussung des Verhaltens der Maschine verantwortlich. Die Maschine kann mechanisch oder numerisch gesteuert werden, wobei über die letzten Jahre vor allem die „Computerized Numerical Control“-Steuerung (CNC-Steuerung) zunehmend an Bedeutung gewonnen hat. Diese verwendet Positions-, Bewegungs- und Hilfsdaten, um die Werkzeugmaschine computergestützt zu steuern (Bahmann, 2013).
Pneumatik	Gewisse Funktionen der Werkzeugmaschine wie Lager und Werkstückeinspannung können anstatt über Hydraulik auch mittels Druckluft betrieben werden (Denkena et alii, 2020).
Schaltschrank	Der Schaltschrank beinhaltet die Steuerungs- sowie Leistungselektronik und muss aufgrund der Wärmeentwicklung gekühlt werden (Denkena et alii, 2020).
Gehäuse	Ist die Verkleidung der Werkzeugmaschine. Sie fördert die Arbeitssicherheit, verringert das Geräuschaufkommen und schützt Funktionselemente vor Spänen und dem Kühlmittel (Neugebauer, 2012).
Prozessmedienversorgung	Abhängig von der Werkzeugmaschine können Bauteile zur Versorgung mit Prozessmedien wie Kühlmittel, Schmierstoff und Druckluft nötig sein (Denkena et alii, 2020).

1.3 Energieverbrauchsanteile

Um effektive Maßnahmen zur Energieeinsparung auf der Komponentenebene setzen zu können, ist es notwendig zu wissen, welche Komponenten einen hohen und welche einen untergeordneten Beitrag zum Energieverbrauch liefern. Aus diesem Grund wurde eine Literaturrecherche zur Ermittlung der Energieverbräuche der Komponenten verschiedener Werkzeugmaschinen durchgeführt. Deren Ergebnisse werden im Folgenden angeführt.

Wie in Tabelle 3 ersichtlich hängt der Energiebedarf einer Werkzeugmaschine von einer Reihe an Einflussfaktoren ab. Aufgrund dieser Abhängigkeiten ist der Energiebedarf verschiedener Arbeitsmaschinen beziehungsweise ihrer Komponenten schwer vergleichbar. Daher werden stattdessen primär die Verbrauchsanteile verschiedener Komponentengruppen am Gesamtenergieverbrauch betrachtet.

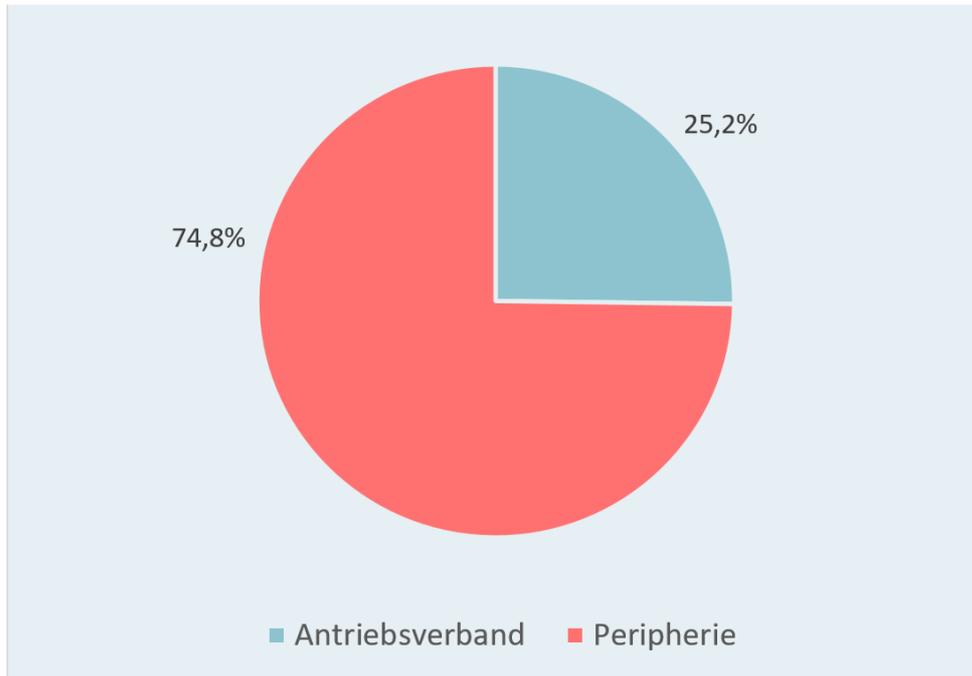
Tabelle 3: Einflussfaktoren auf den Energiebedarf

Bereiche	Faktoren
Werkzeugmaschinen-Eigenschaften	Maschinengröße, Typ, Struktur (Achsenkonfiguration, bewegte Massen ...), Automatisierungsgrad, mechanische Übertragung
Eigenschaften des spanabhebenden Prozesses	Prozessparameter, Kühlstrategie, Bearbeitungsausmaß
Werkstück- und Werkzeugeigenschaften	Werkstückform, -größe, -oberfläche, -qualität, Werkzeuggeometrie, -verschleiß, Materialeigenschaften
Sonstige	Betriebszustand, Produktionsumgebung, Betriebsstunden, Maschinist:in ...

Quelle: Denkena et alii., 2020, Seite 648

Als Erstes wurde der Energieverbrauchsanteil des Antriebsverbandes (Arbeitsspindel, Spindelmotor, Vorschubantrieb ...) ermittelt. Dafür wurden die Komponenten in „Antriebsverband“ und „Peripherie“ (enthält auch unzuordenbaren Energieverbrauch) unterteilt und Durchschnittswerte von 23 Werkzeugmaschinen gebildet. Es zeigt sich, dass der Antriebsverband – jene Baugruppe, die direkt am spanabhebenden Prozess beteiligt ist – während der Bearbeitung nur für knapp ein Viertel des Gesamtenergieverbrauchs verantwortlich ist. Der Großteil des Energieverbrauchs fällt daher durch Peripheriegeräte wie zum Beispiel Maschinenkühlung und Kühlschmierstoffversorgung an.

Abbildung 1: Anteile der Baugruppen am Gesamtenergieverbrauch bei Bearbeitung



Quelle: Daten: Denkena et alii., 2020, 2011; Effizienzfabrik, 2022; Schischke et alii, Task 1, Task 5, 2012; Redecker, 2016; Junge et alii, 2017; Abele et alii, 2012; Petruschke et alii, 2020; Weiss, 2022; Hacksteiner et alii, 2018; Holkup et alii, 2013; eigene Darstellung

Im Folgenden wird veranschaulicht, wie sich der Energieverbrauch nun auf die einzelnen Komponenten aufteilt. Dafür wurden die Daten von 20 Werkzeugmaschinen herangezogen und Durchschnitte gebildet. Aufgrund der unterschiedlichen Detailtiefe beziehungsweise Anzahl der Unterteilungen der verschiedenen Studien wurden die Komponenten für diese Analyse in fünf Kategorien (Antriebsverband, Maschinenkühlung, Kühlschmierstoffversorgung, Hydraulik und Sonstige) unterteilt. Die roten Balken zeigen den Energieverbrauchsanteil der Peripheriegeräte. Betrachtet wurde der Betriebszustand „Bearbeitung“.

Abbildung 2: Energieverbrauchsanteile nach Komponenten im Betriebszustand „Bearbeitung“ (rote Balken: Peripheriegeräte)



Quelle: Daten: Denkena et alii, 2020, 2011; Effizienzfabrik, 2022; Schischke et alii, Task 1, Task 5, 2012; Redecker, 2016; Junge et alii, 2017; Abele et alii, 2012; Petruschke et alii, 2020; Weiss, 2022; Hacksteiner et alii, 2018; Holkup et alii, 2013; eigene Darstellung

Nach dieser Betrachtung hat der Antriebsverband mit 24,5 % den größten Einfluss auf den Energieverbrauch während des Bearbeitungsprozesses. Der bedeutendste Verbraucher unter den Peripheriegeräten ist im Durchschnitt die Maschinenkühlung mit 22,8 % und auch die Kühlschmiermittelversorgung liefert mit 22,3 % einen beträchtlichen Beitrag. Der Anteil der Hydraulik ist mit 8 % deutlich geringer, hat aber dennoch einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch. Der große Anteil von „Sonstige“ geht wohl auf die Art der Unterteilung zurück, da in dieser Kategorie einerseits viele Komponenten zusammengefasst und andererseits „Ausreißer“ inkludiert wurden. Diese „Ausreißer“ umfassen zum Beispiel Maschinen, die Druckluft verwenden – diese verbraucht bei den betroffenen Maschinen bis zu 28 % der Gesamtenergie.

Folgende Tabelle dient zur Veranschaulichung typischer Energieverbrauchsanteile weiterer Peripheriegeräte. Diese wurden im vorhergehenden Diagramm nicht separat angegeben, da sie entweder nicht bei allen Maschinen verbaut sind oder die Detailtiefe der Daten fehlte. Für die Ermittlung der durchschnittlichen Energieverbrauchsanteile wurden daher nicht alle Werkzeugmaschinen miteinbezogen, sondern nur jene, die die

betrachtete Komponente tatsächlich verbaut haben beziehungsweise bei denen Daten für die betrachtete Komponente vorhanden waren.

Tabelle 4: Typische Energieverbrauchsanteile von Peripheriegeräten

Komponente	Anzahl der betrachteten Werkzeugmaschinen	Spannweite der Anteile am Gesamtenergieverbrauch	Durchschnitt der Anteile am Gesamtenergieverbrauch
Pneumatik	3	5–28 %	16 %
Steuerung	3	2–5 %	4 %
Kühlung Steuerkasten	6	2–17 %	6 %
Stromversorgung	4	5–19 %	8 %
Späneförderer	5	1–21 %*	6 %

* Hoher Energiebedarf für Späneförderer bei Schleifmaschine

Quelle: Denkena et alii, 2020, 2011; Effizienzfabrik, 2022; Schischke et alii, Task 1, Task 5, 2012; Redecker, 2016; Junge et alii, 2017; Abele et alii, 2012; Petruschke et alii, 2020; Weiss, 2022; Hacksteiner et alii, 2018; Holkup et alii 2013

In der bisherigen Analyse wurden die Werkzeugmaschinen nur im Betriebszustand „Bearbeitung“ verglichen, der Energieverbrauch hängt jedoch auch von anderen Betriebszuständen ab. In den nachfolgenden Diagrammen werden durchschnittliche Leistungen und Leistungsanteile von neun Maschinen anhand drei unterschiedlicher Betriebszustände veranschaulicht. Es zeigt sich, dass während „Stand-by“ nur knapp 13 % der Energie pro Zeiteinheit im Vergleich zu „Bearbeitung“ verbraucht wird und während „Betriebsbereit“ rund 60 %. Auffällig ist auch, dass sich die benötigte Leistung von Maschinenkühlung und Hydraulik bei Wechsel von „Betriebsbereit“ auf „Bearbeitung“ kaum ändert, während der Verbrauch für Antriebsverband und die Kühlschmiermittelversorgung erwartungsgemäß ansteigt. Im Vergleich zum vorangehenden Diagramm ist bei „Bearbeitung“ hier die KSS-Versorgung mit 33 % der größte Verbraucher.

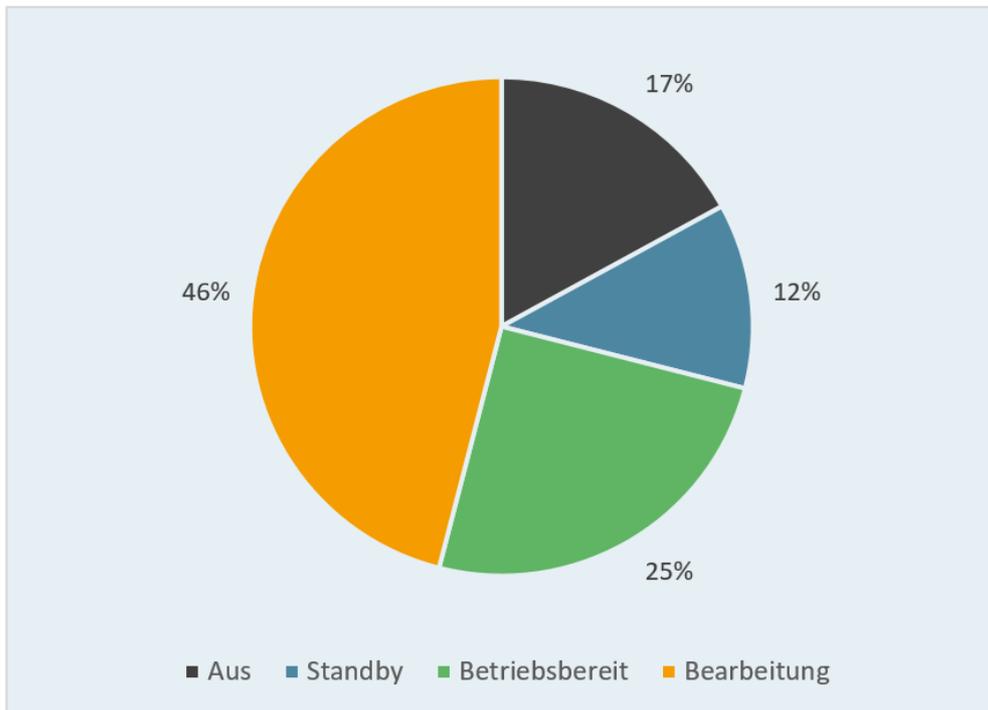
Abbildung 3: Aufgenommene Leistung nach Betriebszustand



Quelle: Daten: Petruschke, 2020; eigene Darstellung

Die zeitliche Verteilung der Betriebszustände wurde in einer Studie von Petruschke et alii anhand von 32 Werkzeugmaschinen untersucht, mit dem Ergebnis, dass sich die Maschinen durchschnittlich 46 % der Zeit im Zustand „Bearbeitung“ befanden, zu 25 % im Zustand „Betriebsbereit“ und zu 12 % im Zustand „Stand-by“ sowie die restliche Zeit ausgeschaltet waren.

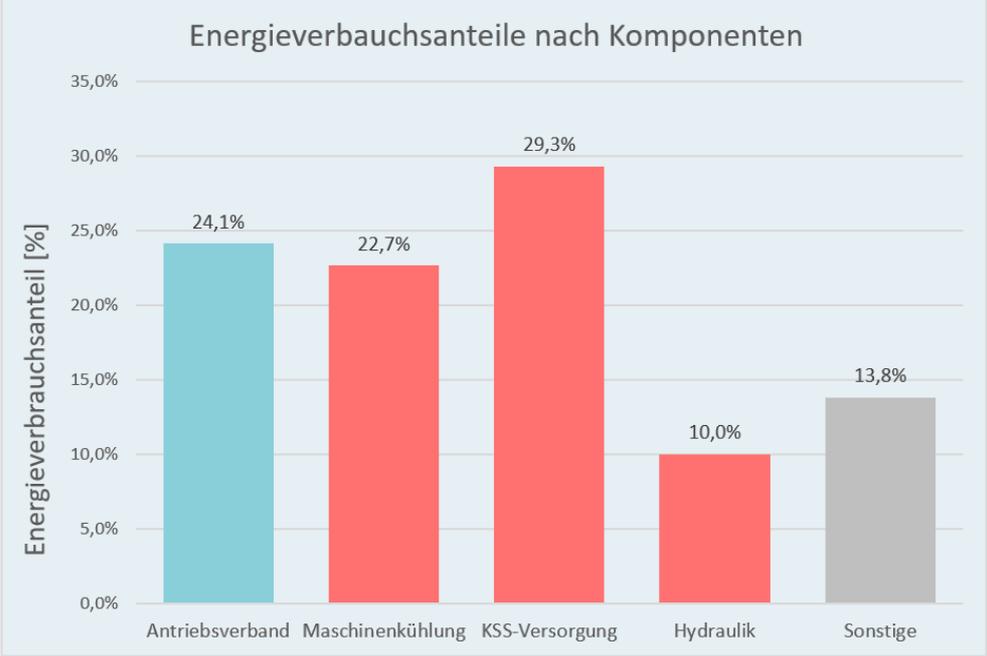
Abbildung 4: Zeitliche Verteilung der Betriebszustände



Quelle: Daten: Petruschke, 2022; eigene Darstellung

Multipliziert man diese Werte (Leistung mal Betriebszeit), erhält man über die gesamte Betriebszeit nachstehende Aufteilung. Insbesondere die Kühlschmierstoffversorgung stellt mit über 29 % den größten Energieverbraucher dar; der Antriebsverband mit 24 % und die Maschinenkühlung mit circa 23 % gehören weiterhin zu den größten Verbrauchern.

Abbildung 5: Energieverbrauchsanteil verschiedener Komponenten von Werkzeugmaschinen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, auf Basis Petruschke, 2020

2 Durchführung Energieaudit – Datenanalyse

Dieses Kapitel beschreibt die Durchführung eines Energieaudits bei Werkzeugmaschinen und konzentriert sich auf den technischen Teil des Audits: die Vorauswahl der Anlagen und die Datenanalyse. Für sinnvolle weitere Elemente eines Audits ist auf die Normen ÖNORM EN 16247-1 und EN 16247-3 verwiesen.

2.1 Schritt 1: Vorauswahl der Anlagen

Bevor mit der groben und genaueren Analyse der Werkzeugmaschinen begonnen wird, ist das Ziel der Vorauswahl der Anlagen, eine Eingrenzung der näher zu betrachtenden Maschinen zu treffen, um nicht für alle Anlagen sämtliche Details zu erheben. Dazu ist eine Liste mit allen Werkzeugmaschinen am Standort zu erarbeiten, die nur folgende ausgewählte Daten enthalten soll:

- Alter der Anlage
- Betriebszeit der Anlage
- Anschlussleistung der Anlage

Über folgenden Bewertungsraster lassen sich dann die Anlagen bewerten:

Tabelle 5: Bewertungsraster zur Vorauswahl der Anlagen

Raster	C	B	A
Alter der Anlage	< 5 Jahre	5–10 Jahre	> 10 Jahre
Betriebsstunden im Jahr	< 500 h	500–4000 h	> 4000 h
Anschlussleistung	< 5 kW	10–50 kW	> 50 kW

Quelle: Sigmatools GmbH, 2022

Anlagen, die mindestens zweimal mit A oder dreimal mit B bewertet wurden, sind jedenfalls genauer zu betrachten.

Als weitere Auswahlkriterien sind relevant (Beck et alii, 2016):

- Betriebsverhalten außerhalb der Betriebszeiten (Stand-by oder Aus)
- Zeitdauer, in der die Maschine während ihrer Betriebsstunden nicht im Bearbeitungs-Modus ist

Maschinen, die sich viel im Stand-by-Modus befinden, sollten bevorzugt untersucht werden.

2.2 Schritt 2: Erfassung der vorhandenen Informationen

Für die in Schritt 1 ausgewählten Anlagen sollen folgende Datenquellen geprüft werden:

- Bereits installierte Energiemessung oder sogenannter Powermonitor
- Technische Dokumentation zur Werkzeugmaschine (mechanische Konstruktionsunterlagen, Produktblätter)
- Elektro-, Pneumatik-, Hydraulikplan der Maschinen
- Typenschild der Maschine
- Informationen aus der Wartungsabteilung
- Aufzeichnung zu Betriebszeiten
- Historische Produktionszeiten, zukünftige Produktionspläne
- Ablesen der Spindelstunden aus der Maschinensteuerung, dem Manufacturing Execution System (MES-System) oder Betriebsstundenzähler

Quelle: Denenka et alii, 2020; Dürr et alii, 2015; Beck et alii, 2016

Auch vor möglichen Messungen müssen typische Nutzungsszenarien beziehungsweise Nutzungszeiten der Maschinen unter Berücksichtigung der unterschiedlichen energetischen Zustände ermittelt werden (Denenka et alii, 2020).

Zur Ermittlung der Bearbeitungszeit und der dabei bearbeiteten Werkstücke kann folgende Tabelle dienen. Die Summe der Bearbeitungszeit kann als Verhältnis zur gesamten Betriebszeit der jeweiligen Maschine dargestellt werden und dient dann dazu, jene Maschinen mit niedrigem Anteil an Bearbeitungszeiten zu identifizieren. Diese sind bevorzugt zu analysieren.

Tabelle 6: Ermittlung der Bearbeitungszeit nach Werkstücken

Werkstücknummer	Anzahl der Werkstücke pro Woche auf Maschinen bearbeitet	Bearbeitungszeit pro Woche in Stunden	Gesamte Bearbeitungszeit in Stunden
Werkstück 1	Auszufüllen	Auszufüllen	Auszufüllen
Werkstück 2	Auszufüllen	Auszufüllen	Auszufüllen
Gesamtanzahl der Werkstücke	Gesamt auszufüllen	Gesamt auszufüllen	Gesamt auszufüllen

Quelle: Beck et alii 2016, Seite 516

Die Arbeitsform eines produzierenden Betriebes wirkt sich über die Betriebsmittelzeit auf die Verteilung der zeitlichen Auslastung aus; mit steigender Seriengröße verringern sich Wartezeiten und beispielsweise die Zeit für die Spanabhebung selbst nimmt zu. In nachstehender Abbildung findet sich eine mögliche Aufteilung der Betriebsstunden in Abhängigkeit der Schichtanzahl im Betrieb. (Abele et alii, 2013)

Tabelle 7: Vergleich der zeitlichen Auslastungen nach jährlichen Betriebsstunden

Schichten	Betriebsstunden pro Jahr	Span-abhebung	Einstellung Werkzeugwechsel	Warte zeit	Span-abhebung	Werk-zeugwechsel	Warte-zeit
1	2.080 h	15 %	30 %	55 %	312 h	624 h	1.144 h
2	4.160 h	27 %	28 %	46 %	1.102 h	1.165 h	1.893 h
3	8.736 h	38 %	26 %	36 %	3.320 h	2.271 h	3.145 h

Quelle: Abele et alii, 2013, Seite 41

Für die einzelnen Betriebszustände ist der Betrieb der einzelnen Komponenten zu prüfen und einzutragen:

Tabelle 8: Ein- und Ausschaltverhalten der Komponenten nach Betriebszuständen

Komponenten	Hauptantrieb	Interface	Kühlschmierstoffpumpe (Hochdruck)	Kühlschmierstoffpumpe (Niederdruck)	Hydraulik	Absauganlage	Späneförderer
Bearbeitung	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus
Betriebsbereit	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus
Warten	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus
Stand-by	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus	Ein, Aus

Quelle: Beck et alii, 2016, Seite 517

Prioritär sind Komponenten zu beachten, die nicht nur in Betrieb sind, wenn sie vom Produktionsprozess angefordert werden, sondern auch laufen, wenn sich die Maschine nicht im Betriebszustand „Bearbeitung“ befindet (Beck et alii, 2016).

Für die Bewertung der unterschiedlichen Einsparmaßnahmen finden Sie Tabellen zur Datenerhebung im Anhang.

Optional: Die folgende Detailtabelle dient zur Erfassung des Drucks und des Volumens in Abhängigkeit des verwendeten Werkzeugs zur Einsparbewertung der Kühlschmierstoffversorgung.

Tabelle 9: Erfassung von Druck- und Volumsdaten verschiedener Komponenten für Hochdruckkühlschmierstoff

Werkzeuge	Druck in bar	Volumenstrom in l/min
Kleine Werkzeuge	Auszufüllen	Auszufüllen
Mittelgroße Werkzeuge	Auszufüllen	Auszufüllen
Große Werkzeuge	Auszufüllen	Auszufüllen

2.3 Durchführung von Messungen

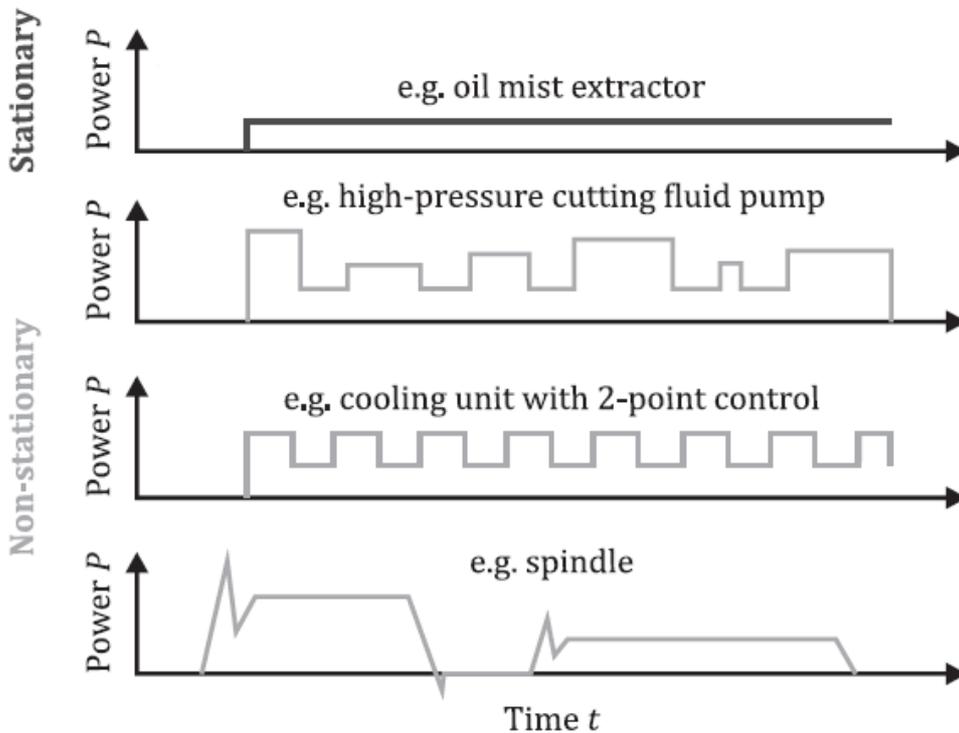
Zunächst ist zu prüfen, ob die betroffene Werkzeugmaschine bereits gemessen wird sowie ob die Daten verfügbar und verlässlich sind. Das kann beispielsweise maschinenintern über die speicherprogrammierbare Steuerung, den Powermonitor oder über das betriebsinterne Energiemesssystem erfolgen. Gegebenenfalls sind Sensoren wie Wärmemengenzähler und Druck- oder Volumenstromsensoren verbaut, die über die Maschine auszulesen sind.

Vor der Durchführung von Messungen für Werkzeugmaschinen ist zu definieren, welche Anlagen in der Systemgrenze enthalten sind beziehungsweise sein sollen. Auf Basis dessen sind die elektrischen Anschlüsse zu identifizieren und Messpunkte festzulegen. Bei Verwendung geeigneter Messgeräte, wie teilbare Messwandler für die Strommessung oder Clamp-on-Ultraschall-Durchflusssensoren, muss die Werkzeugmaschine nicht abgeschaltet werden. Die Messauflösung bei 100 ms ermöglicht jedenfalls die Analyse dynamischer Prozesse.

Vorteilhaft ist eine mehrkanalige Messung über alle Anschlüsse und auch für den Druckluftbedarf am besten über mehrere Werktage und über das Wochenende (zehn Kalendertage). Dabei können zum Beispiel Stand-by-Zeiten – also Zeiten, in denen nichts bearbeitet wird, aber dennoch Energieverbrauch auftritt – identifiziert und analysiert werden. Beispielsweise sollte geprüft werden, ob in dieser Zeit die Kühlschmiermittelpumpe und der Späneförderer ausgeschaltet sind.

Die Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine setzt sich jedenfalls aus Anteilen verschiedener Werkzeugmaschinen-Komponenten zusammen, die am gemessenen Anschluss mitgemessen werden. Die Ölnebelabsaugung kann einen stationären, vom Maschinenzustand unabhängigen Leistungsbedarf benötigen und ist in den meisten Fällen permanent aktiv. Andere Komponenten können auch nicht stationäre Leistungsprofile aufweisen, zum Beispiel ein Kompressor mit einer Zwei-Punkt-Regelung. Eine Kühlschmierstoffpumpe kann in verschiedenen Betriebspunkten einen unterschiedlichen Leistungsbedarf haben. Das Lastprofil einer Spindel zeigt die Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge (Denkena et alii, 2020).

Abbildung 6: Qualitative Lastprofile für verschiedene Maschinenkomponenten



Quelle: Denkena et alii, 2020, Seite 649

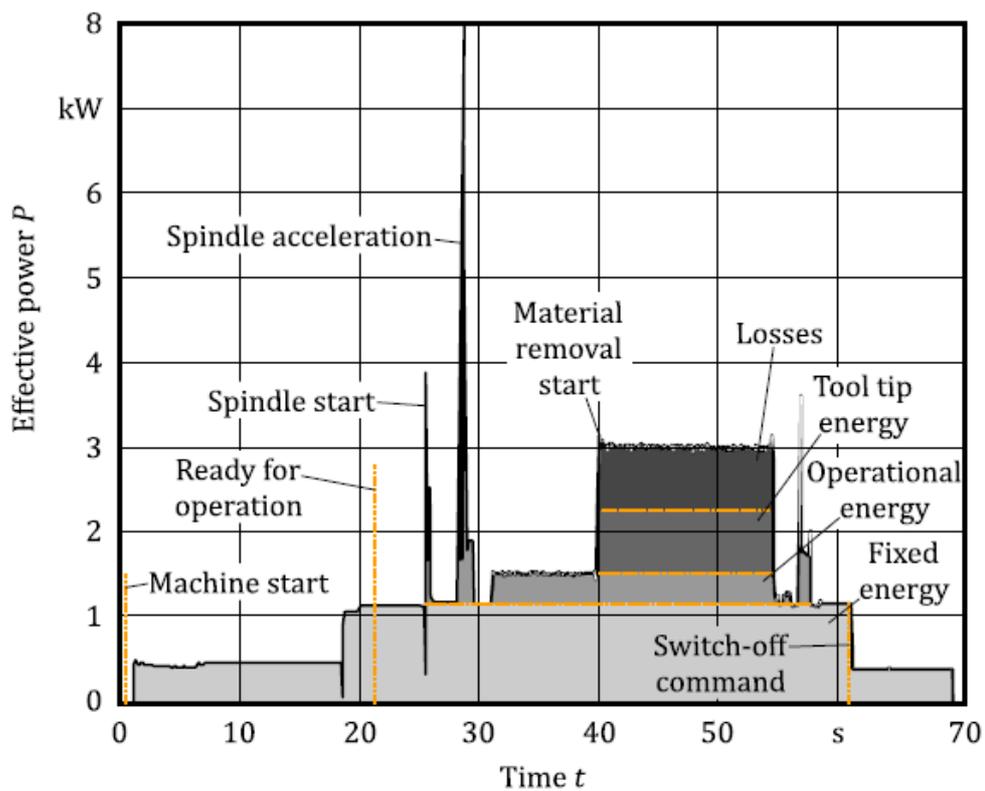
Die Addition dieser Leistungsprofile der Komponenten ergibt das Leistungsprofil am Hauptanschluss, wie in folgender Abbildung 7 für einen Arbeitsvorgang dargestellt.

Angeführt sind die Zustände Maschinenstart, Betriebsbereit, Spindelstart, Spindelbeschleunigung, Start der Materialabtragung, Energiebedarf der eigentlichen Materialabtragung durch das Werkzeug (Tool Tip Energy), Energie für den Zustand Betriebsbereit, die Energie für Grundlast und das Ausschaltsignal. Die eingezeichneten horizontalen Linien sind beispielsweise im Falle von „Tool Tip Energy“ berechnet.

Die Wirkleistung wurde am Hauptschalter vom Einschaltzeitpunkt bis zur vollständigen Abschaltung gemessen. Die Messergebnisse zeigen eine hohe Grundlast, das heißt den konstanten Energiebedarf zur Sicherstellung der Betriebsbereitschaft der Maschine. Zusätzliche Energie (bezeichnet als Betriebsenergie/operational energy) wird für die Bewegung der Vorschubachsen und die Drehung der Hauptspindel benötigt, wie zum Beispiel bei einem Luftschnitt. Nur ein relativ kleiner Anteil der eingebrachten Energie wird für den eigentlichen Materialabtrag genutzt („Tool Tip Energy“). Darüber hinaus entstehen weitere Verluste während der Bearbeitung, zum Beispiel in Form von Wärme

durch erhöhte Reibung und ohmsche Verluste. Insbesondere vergeht eine gewisse Zeit nach dem Abschaltbefehl, bis alle Komponenten inaktiv sind und die Leistungsaufnahme der Werkzeugmaschine auf null sinkt. Der feste und der für den Betrieb notwendige Energiebedarf können durch Leistungsmessungen bei der Durchführung von Luftschnitten ermittelt werden. Die Werkzeugspitze Energie wird jedoch in der Regel durch Berechnungen auf der Grundlage der zu erwartenden Schnittkräften ermittelt (Denkena et alii, 2020).

Abbildung 7: Lastprofile eines Drehprozesses



Quelle: Denkena et alii, 2020, Seite 649

3 Einsparmaßnahmen

Dieses Kapitel beschreibt die wichtigsten möglichen Einsparmaßnahmen bei einer Werkzeugmaschine und gibt Vorschläge, wie diese zu bewerten sind.

3.1 Durchführung beziehungsweise Installation von Messungen

Die VDMA 34179 „Messvorschrift zur Bestimmung des Energie- und Medienbedarfs von Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung“ gibt an, wie man Maschinen auf standardisierte und einfache Weise bewerten kann. Der Maschinenlieferant muss dazu ausweisen, welchen Energiebedarf Maschinen in verschiedenen energetischen Zuständen haben. Diese Vorschrift hebt hervor, dass sowohl alle energierelevanten Prozesse als auch alle Betriebszustände einer Anlage relevant sind. Sie kann als Leitfaden zur Durchführung von einmaligen oder fix installierten Messungen von ähnlichen Maschinen dienen.

Folgende allgemeine Angaben sind dazu notwendig:

- Maschinenangabe (Hersteller, Seriennummer, Softwarestand ...)
- Angabe Prozessparameter (zum Beispiel Kühlschmierstoffspezifikation)
- Angabe zu Werkstück
- Weitere Randbedingungen (Umgebungs-, Rohteiltemperatur, relative Luftfeuchte)

Quelle: Kulterer, 2019

Tabelle 10: Zu erfassende Energien und Medien und Parameter laut VDMA 34179

Zu erfassende Energien und Medien	Gemessene Parameter
Elektrische Energie	Wirkleistung, Scheinleistung, Blindleistung
Druckluft	Volumenstrom, Anschlussdruck
Kühlschmierstoff	Volumenstrom
Absaugung	Volumenstrom
Kühlwasser	Volumenstrom, Vorlauf-, Rücklauftemperatur

Zu erfassende Energien und Medien	Gemessene Parameter
Prozessgase	Volumenstrom

Quelle: Kulterer, 2019, adaptiert

Als ein Fallbeispiel für die Möglichkeiten, die Datenerfassung bietet, folgt die Beschreibung von Innio Jenbacher, der Hauptproduktionsstätte für Jenbacher Gasmotoren. Das Unternehmen wollte den Energiebedarf am Wochenende senken. Über mehrere Wochen wurde gemeinsam mit dem Bedien- und Instandhaltungspersonal in einem Pilotbereich von rund 55 Produktionsmaschinen geprüft, welche Maschinen am Wochenende nach Schichtende eingeschaltet bleiben, und der Grund dafür wurde identifiziert. Wo es möglich war, wurden dann technische Maßnahmen an den Maschinen umgesetzt, genaue Abschaltzustände definiert und automatisiert. Ein wöchentlicher Report stellte den gemessenen elektrischen Energie- und Druckluftbedarf sowie die damit verbundene CO₂-Erzeugung als Säulendiagramm über die betriebsfreie Zeit am Wochenende dar. Darauf war auf einem Blick zu erkennen, ob die festgelegte Schwelle des Energiebedarfs für Druckluft und Strom erreicht wurde.

Topverbraucher wurden ebenfalls grafisch über Säulen gereiht dargestellt. So waren bei ähnlichen Produktionsmaschinen Ausreißer sofort erkennbar. Gemeinsam mit dem Bedienpersonal wurden dann etwaige Maßnahmen besprochen.

Durch diesen Prozess wurde der Bedarf an elektrischer Energie und an Druckluft am Wochenende um 30 % gesenkt und eine jährliche Einsparung erzielt, die dem Energieverbrauch von circa 200 Haushalten entspricht.

Mithilfe der Energiemessung konnten im Rahmen des Condition-Monitorings außerdem mögliche Ereignisse weiter eingegrenzt und behoben werden.

Beispielsweise löste sich in manchen Fällen der Druckluftschlauch zu einer Spindeleinheit vom Fitting. Dabei wurden aber auch eingebaute Luftdrosseln ausgeblasen, sodass bei einfachem Anschließen der Schläuche ein erhöhter Druckluftbedarf entstand. Während ohne Monitoring diese Ereignisse nicht erkennbar wären, konnten dank der Visualisierung sofort Maßnahmen gesetzt und der Druckluftverlust, der einem Drittel des Vollastdruckluftbedarfs entsprach, abgestellt werden.

In einem anderen Fall konnten zwei unterschiedliche Druckluftlecks entdeckt werden: Eines davon erhöhte den Druckluftgrundverbrauch rund um die Uhr, während eine gleichzeitig aufgetretene Leckage den auf der grafischen Auswertung klar erkennbaren Spitzenverbrauch erhöhte (Kulterer, 2022).

3.2 Optimierung des Abschaltmanagements (Stand-by-Manager)

In vielen Betrieben werden Maschinen auch am Wochenende, in Pausen, bei Teilemangel oder bei Störungen in voller Betriebsbereitschaft belassen. Nebenaggregate und Antriebe verursachen dabei eine Grundlast im einstelligen Kilowattbereich (Abele et alii, 2013). Generell ist jedoch das Ziel, die Maschine so lange wie möglich im ausgeschalteten Zustand zu setzen und dadurch die Effizienz zu erhöhen.

Mit einem **Stand-by-Manager** kann die Maschine beim Auftreten bestimmter Ereignisse nach einer gewissen Zeitspanne in einen Zustand geringerer Energieaufnahme geschaltet werden. Beispiele für Ereignisse sind: länger andauernde Inaktivität, Melden von Teilemangel durch Beladeeinrichtung, Befehl der Fertigungssteuerung zu Ende der Schicht oder Schließen der Türe (Abele et alii, 2013).

Diesen Ereignissen können dann Verzögerungszeiten zugewiesen werden, sodass zum Beispiel Antriebe nach einer Stillstandszeit geklemmt und stromlos geschaltet werden. Auf dieser Basis können Funktionen zur Deaktivierung verschiedener Nebenaggregate wie Kühlung, Kühlschmierstoffpumpen, Achsenmotoren, Licht im Bearbeitungsraum, Absauganlage, Späneförderer et cetera erstellt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass eine voreilige Abschaltung der Kühlung sowie KKS-Versorgung zu thermischen Verlagerungen führen kann. Dies kann wiederum einen höheren Ausschuss zur Folge haben, was mit einer negativen Auswirkung auf die Energiebilanz einhergeht (Heidenhain, 2010). Daher sind bei Umsetzung dieser Maßnahme die Auswirkungen auf die Qualität der Produkte zu beobachten.

Konkrete Beispiele für Einstellungen an einer Werkzeugmaschine können sein:

- Hilfsantriebe: Abschalten der Hilfsantriebe zehn Minuten nach Beendigung der Zerspanung oder früher
- Spindelkühlgerät: Abschalten 150 Sekunden nach Beendigung der Zerspanung (Wärme wird noch abgeführt)
- Ölnebelabscheider: Abschalten zwei Minuten nach Beendigung des Programms
- Spänenförderer Laufzeit: 30 Sekunden, dann Pausenzeit von 200 Sekunden
- Arbeitsraumleuchte: null Minuten, also sofort nach Beendigung der Zerspanung
- Peripherie: eine Minute

Quelle: (Esslinger, 2022)

Weiters bieten Maschinen die Möglichkeit der Komplettausschaltung an bestimmten Tagen. Dabei ist auch das Wiedereinschaltemanagement zu konfigurieren: Wenn die Schicht zum Beispiel um 6:00 Uhr anfängt, kann um 5:50 Uhr das Warmlaufprogramm gestartet werden, damit Arbeiter:innen eine bereits warm eingefahrene Maschine vorfinden.

Wichtig sind dabei kurze Ein- und Ausschaltvorgänge (fünf Sekunden beziehungsweise 20 Sekunden). Beispielhaft kann bei einem Drei-Schicht-Betrieb 23 %, bei einem Ein-Schicht-Betrieb 60 % des Gesamtenergieverbrauchs eingespart werden (Abele et alii, 2013).

Zusätzlich sollte die Maschine über einen Powermonitor mit Echtzeitdarstellung der Leistungen der Einzelkomponenten und eine Energiemessung verfügen.

Eine spezifische Einsparmaßnahme betrifft die sogenannte Parkdrehzahl von Spindeln, die zum Beispiel zwischen 1000 und 3200 U/min liegen können, um kurze Beschleunigungszeiten auf die jeweiligen Bearbeitungsdrehzahlen zu erreichen. Durch eine Verringerung dieser Drehzahl auf 500 U/min konnten in einem Fall der elektrische Gesamtverbrauch während der Bearbeitung um 9 % reduziert werden, ohne die Taktzeit negativ zu beeinflussen (Dürr et alii, 2015).

3.3 Einstellung der Schneidparameter, Reduktion der Neben- und Bearbeitungszeiten, Werkzeugoptimierung

Durch Optimierung der Schneidparameter und Programmierung des Werkzeugpfades (zum Beispiel bei fünfachsiggen Maschinen) sowie Vermeidung von Luftschnitten (also Spindelbewegung ohne Werkstückkontakt) lassen sich große Einsparungen erzielen.

Numerical Control-(NC-)Programme von Werkzeugmaschinen können durch Nutzung virtueller Maschinen im Vorfeld geschrieben, getestet und optimiert werden. Dadurch wird das Programmieren an der Maschine selbst so weit wie möglich vermieden. Der externe Programmierplatz benötigt weniger Energie und die Rüstzeiten der Maschine werden minimiert. Hersteller stellen dazu Daten der Maschine zu Verfügung.

3.3.1 Einstellung der Schneidparameter

Das Ziel der spanabhebenden Fertigung ist die Materialabtragung. Die Prozessparameter, die dies erreichen sind unter anderem: Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Schnittbreite. Diese haben aber auch Einfluss auf die Spindellast, die Abnutzung des Werkzeugs sowie die Anforderung an die Kühlung und Kühlschmierstoffversorgung.

Während für Schleifen 300 bis 12.000 J/mm³ Materialabtrag erforderlich sind, benötigen Drehen und Fräsen 1 bis 100 J/mm³ Materialabtrag (Hacksteiner et alii, 2018). Daher ist es sinnvoll, Schleifprozesse so weit wie möglich durch vorheriges Drehen und Fräsen zu minimieren.

Vor allem beim Schleifen sind die angewandte Technik und Werkzeuge entscheidend. Beispielsweise hat Hubschleifen einen 20-mal höheren spezifischen Energiebedarf als Tiefgangschleifen aufgrund der geringeren Einschnitttiefe bei Letzterem (Hacksteiner et alii, 2018).

Der spezifische Energiebedarf während des Schleifens

- sinkt bei höherer Materialabtragsrate aufgrund der kürzeren Prozessdauer sowie des damit einhergehenden geringeren Energiebedarfs für Peripherieanlagen und
- steigt linear mit der Schneidgeschwindigkeit aufgrund des höheren Leistungsbedarfs bei höherer Spindeldrehzahl.

Quelle: Hacksteiner et alii, 2018

Beim Fräsen sind die Tiefe des Schnitts und die Vorschubgeschwindigkeit („Feed per Tooth“) die wesentlichen Parameter. Durch Verdopplung der Vorschubgeschwindigkeit konnte in einem Beispiel der Energiebedarf um 28 bis 35 % reduziert werden. Durch Anpassung der Prozessparameter (Eingriffsweite, Geschwindigkeit) konnte bei einem anderen Beispiel bei gleichbleibender Materialabtragsrate der Energiebedarf um 18 % vermindert werden. Ähnliches gilt fürs Drehen.

Beim Bohren ist der Energiebedarf weitgehend unabhängig vom gewählten Vorschub. Wenn also der Vorschub um 25 % höher gewählt wird, verringert sich die Prozesszeit entsprechend und neben einer höheren Produktivität senkt dies die spezifischen Energiekosten (Esslinger, 2022). So konnte in einem Beispiel durch verkürzte Prozesszeit infolge höherer Vorschubgeschwindigkeit und größerer Schnittgeschwindigkeit 5 % Einsparung erzielt werden (Denkena et alii, 2020).

Denkena empfehlen allgemein eher die Spandicke und Eingriffsweite als die Schnittgeschwindigkeit zu erhöhen. Zu beachten sind jedenfalls die Qualitätsanforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit. Außerdem kommt es zu einer höheren Beanspruchung des Werkzeugs, was durch hochwertige und dafür ausgelegte Werkzeuge ausgeglichen werden kann. Ein rechtzeitiger Ersatz des Werkzeugs kann durch ein Monitoring der Stromaufnahme der Spindel gewährleistet werden. (Denkena et alii, 2020)

Wenn die Möglichkeiten gegeben sind, verschiedene Operationen parallel abzuarbeiten, zum Beispiel durch vierachsiges Drehen, so ist dies im Sinne der Energieeffizienz wie auch der Produktivitätssteigerung anzuwenden (Esslinger, 2022).

3.3.2 Reduktion der Neben- und Bearbeitungszeiten

Neben dem Einsatz effizienterer Komponenten und Werkzeuge sowie der Deaktivierung nicht benötigter Maschinenkomponenten außerhalb des Bearbeitungszustandes beziehungsweise Anpassung an den tatsächlichen Leistungsbedarf während der Spanabhebung kann die Einschaltdauer der Komponenten während und außerhalb der Zeit der Spanabhebung (Nebenzeiten, wie Stand-by, Not-Aus, Produktionsbereitschaft) beeinflusst und reduziert werden (Dürr et alii, 2015).

Aus dem Blickwinkel der Energieeffizienz ist grundsätzlich die Reduktion der Prozesszeit anzustreben. Der dabei entstehende zusätzliche Energieverbrauch während der

Bearbeitungszeit ist zumeist gering, gemessen an der absolut benötigten Energie im Zerspanprozess (Esslinger, 2022).

Außerhalb der Spanabhebungszeit dienen folgende Maßnahmen der Reduktion der Einschaltdauer:

- Reduktion der Werkzeugpositionierzeit durch optimierte Bearbeitungsstrategien
- Überlagerung von Abläufen
- Reduktion der Werkzeugwechselzeit
- Reduktion der Werkstückwechselzeit

Quelle: Dürr et alii, 2015

Beispiele sind:

- Durch eine CNC-Bedienoberfläche mit Workflow-orientiertem Bedienkomfort verkürzen sich die Zeiten zum Rüsten und Programmieren (Ferrocontrol, 2014).
- In der Aufspannsituation des Werkstücks müssen die Bezugspunkte für das NC-Programm erfasst werden. Tastsysteme beschleunigen dabei das Einrichten und verbessern die Qualität durch schnelle und sichere Vermessung von Werkzeugen und Werkstücken (Ferrocontrol, 2014).
- Bei einer Analyse einer Mehrspindelanlage war am Anfang des Bearbeitungszyklus eine Leistungsaufnahme der Achsantriebe (Beschleunigungs- und Verzögerungsspitze) zu erkennen, um die Achsen des Werkstücks zur ersten Bearbeitungsspindel zu positionieren. Erst nach anschließender Beschleunigung der Spindel auf Bearbeitungsdrehzahl wurde die eigentliche Bearbeitung (mit Bearbeitungsvorschub) gestartet. Durch Parallelisierung des Spindelanlaufs mit dem Achs-Positioniervorgang konnte die Taktzeit um 2,4 Sekunden reduziert werden (Dürr et alii, 2015).
- Eine weitere Einsparmöglichkeit ist das Verwenden von Stufenbohrern und der damit verbundenen Kombination von Bohren und Senken. Dies reduziert ebenfalls die Prozesszeit und spart einen Werkzeugwechsel ein. Damit erhöht sich prozentual die Hauptzeit am Werkstück, was gleichzeitig einer Energieeinsparung gleichkommt (Esslinger, 2022).
- Externe NC-Programmierung über moderne CAD/CAM-Systeme (Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing) und anschließende Simulation unter Anwendung des digitalen Zwillings (mit echter Abbildung des NC-Kerns) reduzieren vor allem die Rüstzeiten an der Maschine enorm und tragen zur Produktivitätssteigerung und Energieeinsparung bei (Esslinger, 2022).

Während der Zeit der Spanabhebung kann die Bearbeitungsdauer durch folgende Maßnahmen reduziert werden:

- Optimierung der Bearbeitungsstrategie
- Parallelisierung von Prozessen
- Einsatz besserer Werkzeuge beziehungsweise Prozesstechnologie zur Erhöhung der Prozessrate

Quelle: Dürr et alii, 2015

Eine weitere Maßnahme ist die Prozessaufteilung auf mehrere Maschinen: Einfachprozesse wie beispielsweise Entgraten müssen nicht auf einer energieintensiven Drehmaschine oder in einem Bearbeitungszentrum gemacht werden. Gewinde können auf einer Gewinderollmaschine wesentlich energieeffizienter hergestellt werden. Dies hat natürlich nur Anwendungsmöglichkeit in der Serien- und Massenfertigung, nicht in der Einzelteil- oder Kleinserienfertigung. Hier ist die Komplettbearbeitung in der Regel zu bevorzugen (Esslinger, 2022).

Wie oben beschrieben können Vorschubgeschwindigkeit erhöht und der Anteil der Spanprozesse minimiert werden. Müssen zur Erreichung der entsprechenden Qualität Parameter wie Schnitttiefe, Vorschubgeschwindigkeit, Spindeldrehzahl konstant gehalten werden, gibt es dennoch Möglichkeiten, den Energieverbrauch zu senken: Große fünfachsigige Maschinen, die sehr große Bauteile über viele Stunden bearbeiten, haben einen hohen Energieverbrauch. In einem Fall konnte im Vergleich zur „Iso-scallop Height Method“ 25 % Einsparung bei einer fünfachsigigen Maschine durch verbessertes Toolpath-Programming erzielt werden. Dazu wurde als Zielgröße der spezifische Leistungsbedarf an jedem Fräserkontaktpunkt sowie entlang jeder Vorschubrichtung erfasst und auf dieser Basis der optimale Toolpath definiert (Xu et alii, 2016).

3.3.3 Werkzeugoptimierung

Durch die Verwendung von Hochleistungsmaterialien, beispielsweise beim Einsatz von Stufenbohrern, kann die Prozesszeit verringert werden und damit Energie gespart werden: Stufenbohrer benötigen dann weniger Eingriffzeit und/oder weniger Werkzeugwechsel.

Ein häufig verwendetes Material in diesem Zusammenhang ist CBN (Cubic Boron Nitride; kubisches kristallines Bornitrid), eine chemische Verbindung von Bor und Stickstoff.

Allgemein ist es härter als zum Beispiel Siliziumkarbid oder Korund und wird zum Schleifen von gehärteten Schnellarbeitsstählen (High Speed Steel – HSS) eingesetzt.

CBN wird aufgrund seiner Härte sowie chemischen und thermischen Stabilität für Präzisionsschleifanwendungen eingesetzt. Für Hochleistungslegierungen mit hoher Schneidgeschwindigkeit ergibt sich dadurch eine höhere Produktivität. Gleichzeitig sind aber mit dem Einsatz auch höhere Ansprüche an Spindelsteifheit und -kühlung, an das Abrichten der Schleifscheibe und an Kühlschmierstoffe verbunden (Hacksteiner et alii, 2018).

CBN wird aber auch in der Zerspaltung mit geometrisch bestimmter Schneide häufig eingesetzt, beispielsweise wenn es um Gussbearbeitung oder Hartbearbeitung geht. Neben der höheren Standmenge der CBN-Schneide sind auch deutlich höhere Schnittparameter möglich, die somit die Prozesszeit reduzieren (Esslinger, 2022).

Durch High-Speed-Cutting-(HSC-)Fräsbearbeitungen sind die Temperaturen an der Wirkzone geringer als bei der konventionellen Zerspaltung. Zwar entsteht durch höhere Schnittgeschwindigkeiten generell mehr Temperatur, diese wird in der HSC-Bearbeitung aber zu einem deutlich höheren Prozentsatz durch den Span abgeführt. Vereinfacht ausgedrückt hat die Temperatur durch die hohen Geschwindigkeiten gar keine Zeit, ins Werkzeug oder in das Werkstück einzudringen (Esslinger, 2022).

Die Anwendung der Minimalmengenschmierung-(MMS-)Technologie ist ebenfalls eine gute Form der Energieeinsparung. Durch den Wegfall des klassischen Kühlschmierstoffsystems reduzieren sich nicht nur die Kosten hierfür (circa 16 % der gesamten Betriebskosten einer Werkzeugmaschine entfallen dafür), es reduzieren sich auch die dafür benötigten Aggregate (Pumpen, Filterung et cetera). Mit moderner MMS-Technologie lassen sich vielfach höhere Schnittdaten fahren als mit konventioneller KSS-Technologie. Die MMS stößt aber an ihre Grenzen, wenn es beispielsweise um den Spänetransport beim Tieflochbohren geht. Abhängig vom Werkstoff ist hier die konventionelle KSS-Technik noch unverzichtbar (Esslinger, 2022).

Durch neue Beschichtungen kann auch die Reibung minimiert und die Zerspaltungstemperatur gesenkt werden.

3.4 Optimierung des Hydrauliksystems

Hydraulikeinheiten werden unter anderem für folgende Anwendungen benötigt:

- Spannen und Lösen des Werkzeugs beim Werkzeugwechsel
- Spannung des Werkstücks
- Öffnen und Schließen der Beladetür

Leckagen im System können aber der bei weitem wichtigste Verlustfaktor sein.

Hydraulikeinheiten sind für ca. 8 % des gesamten elektrischen Energiebedarfs in Werkzeugmaschinen verantwortlich (Denkena et alii, 2020).

3.4.1 Pumpenregelung

Pumpen mit konstanter Drehzahl in Kombination mit Speichern sind eine effiziente Lösung, wenn der Bedarf an Hydraulik unregelmäßig auftritt, und haben folgende Vorteile:

- Der Speicher erlaubt eine rasche Reaktion und eine relativ kleine Pumpengröße.
- Unterschiedliche Druckniveaus können mit mehreren Speichern und einer einzigen Pumpe erreicht werden.
- Die Pumpe kann zu Zeiten ohne Hydraulikbedarf komplett ausgeschaltet werden, wodurch kein Umlauf notwendig ist.

Quelle: Denkena et alii, 2020

Als Nachteil bei häufigerem Betrieb ist zu nennen: Durch oftmalige Motorstarts wird mehr Wärme in das Hydrauliksystem eingebracht.

Frequenzgeregelte Pumpen ermöglichen bei fluktuierendem hydraulischen Leistungsbedarf eine bedarfsorientierte Versorgung des Hydrauliksystems mit dem passenden Druck und Volumenstrom. Aufgrund des fehlenden Speichers haben sie eine höhere elektrische Anschlussleistung und einen kontinuierlichen Betrieb zur Abdeckung der Leckagenverluste. Durch Ausstattung einer bestehenden oder neuen, optimierten Pumpe mit Frequenzumrichter lassen sich mindestens 30 % einsparen. In konkreten Fallbeispielen waren es 76 % gegenüber der Anwendung einer Zahnradpumpe mit

Speicherladeeinheit und 46 % gegenüber einer Drehschieberpumpe mit Druckbegrenzungsventil.

Die dritte Möglichkeit ist der Einsatz einer **Verstellpumpe** mit verstellbaren Kolben, um das Fördervolumen zu beeinflussen. Diese Pumpenart hat eine lange Reaktionszeit und benötigt ebenfalls durchgehend Energie, um die Leckagen auszugleichen. Sie sind besonders für einen hohen hydraulischen Leistungsbedarf geeignet (Denkena et alii, 2020).

3.4.2 Optimierung von Systemen mit Speichern

Das Hydraulikaggregat besteht aus einer Innenzahnradpumpe mit Asynchronmotor und einem Speicher. Fällt der Druck im Speicher unter den eingestellten unteren Schaltpunkt (zum Beispiel 115 bar), wird der Speicher beladen; das heißt, die Pumpe wird vom drucklosen Umlauf in den Förderbetrieb geschaltet (Abele et alii, 2013). Bei Erreichen des oberen Schaltpunkts im Speicher wird die Pumpe wieder getrennt.

Während des drucklosen Umlaufs hat die Hydraulikpumpe einen bestimmten Leistungsbedarf. Ebenso kommt es zu einem erhöhten Rückkühlbedarf, da eine große Wärmemenge in das Öl eingebracht wird. Generelles Ziel ist es daher, den drucklosen Umlauf zu vermeiden und stattdessen die Pumpe, wenn möglich, abzuschalten. Durch Umstellung von drucklosem Umlauf auf Start-Stopp konnte beispielsweise in einem Fall der Energieverbrauch um 66 % reduziert werden (Hacksteiner, 2022).

Der Pumpenmotor hat allerdings eine maximale Schalthäufigkeit und kann daher nicht beliebig oft ein- und ausgeschaltet werden. Diese Schalthäufigkeit für den jeweiligen Motor kann aus Datenblättern der Hersteller übernommen werden. Insofern muss auch die Pausenzeit zwischen den Ladevorgängen maximiert werden. Das kann durch Einsatz von Sitzventilen zur Minimierung der Leckageverluste oder durch Anpassung der Speicherladeschaltung umgesetzt werden. Mit diesen Maßnahmen wird der Aussetzbetrieb der Pumpen ermöglicht und der drucklose Umlauf vermieden. Die Einsparung ergibt sich daraus, dass die Pumpe länger abgeschaltet werden kann, weil sie den Leckagenverlust nicht (so oft) abdecken muss, um den Systemdruck zu erhalten.

3.4.2.1 Einsatz von Sitzventilen

Die Hydraulikpumpe wird, wenn die Maschine eingeschaltet ist, in regelmäßigen Abständen zugeschaltet (zum Beispiel alle 30 Sekunden), um Leckagenverluste in den Schieber- beziehungsweise Druckregelventilen auszugleichen (Abele et alii, 2013).

Der Leckagevolumenstrom errechnet sich mit folgender Formel, wobei die Zeit zwischen den Ladezyklen gestoppt wird:

Formel 1: Berechnung des effektiven Speichervolumens

$$\Delta V = V_0 * \left(\frac{p_0}{p_1}\right) * \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{1,4}}\right]$$

ΔV Effektives Speichervolumen, zum Beispiel 0,095 l

V_0 Speichervolumen [l], zum Beispiel 3,5 l

p_0 Speicherfülldruck [bar], zum Beispiel 70 bar

p_1 Unterer Schaltepunkt [bar], zum Beispiel 103 bar

p_2 Oberer Schaltepunkt[bar], zum Beispiel 109 bar

Quelle: Abele, 2013

Formel 2: Berechnung des Leckagenvolumenstroms

$$\text{Leckagenvolumenstrom} = \Delta V / t$$

ΔV : Effektives Speichervolumen

t : Zeit zwischen Ladezyklen zur Bestimmung des Leckagenvolumenstroms [s]

Quelle: Abele, 2013

Der Leckagenvolumenstrom vor und nach Umsetzung der Maßnahme wird dann in Bezug zum effektiven Speichervolumen gesetzt, um zu errechnen, wie oft der Speicher nach Leckagenvermeidung beziehungsweise Speichervolumenerhöhung während der Nebenzeiten nachgeladen werden muss.

Durch Einsatz von Sitzventilen anstelle von Schieberventilen können die Leckagen reduziert werden, damit die Pumpe beispielsweise nur noch alle sieben Minuten zugeschaltet wird (Abele et alii, 2013). Die energetische Bewertung erfolgt wie bei der Vergrößerung des Speichervolumens.

3.4.2.2 Vergrößerung des Speichervolumens/Speicherladeschaltung

Der drucklose Umlauf kann durch einen größeren Speicher und eine Vergrößerung der Hysterese vermieden werden. Das nutzbare Speichervolumen ist dabei abhängig vom Speichervolumen und Fülldruck, außerdem vom oberen und unteren Schaltpunkt (also der Speicherhysterese). Die Istwerte können vom Hydraulikplan der Maschine oder vom Drucksensor ermittelt werden. Die Werte für den nutzbaren Speicher können mit dem Wert nach einer möglichen Verbesserung verglichen werden. Siehe Formel 2.

3.4.3 Energetische Bewertung

Zunächst ist das Nutzungsprofil der Werkzeugmaschine zu erheben. Dabei ist auch festzuhalten, wann das Hydrauliksystem eingeschaltet bleibt und ob bereits ein Stand-by-Betrieb definiert ist (Abele et alii, 2013). Beispielsweise kann ein Anteil des drucklosen Umlaufs an der Betriebsmittelnutzungszeit angenommen werden, zum Beispiel 90 % der gesamten Einschaltzeit, wenn auch das Hydrauliksystem eingeschaltet bleibt.

Weiters ist der elektrische Leistungsbedarf der Pumpe im drucklosen Umlauf im Datenblatt der Hersteller unter Angaben zur minimalen Antriebsleistung der Pumpe bei einer Druckerhöhung von 0 bar zu ermitteln. Falls dort die Wellenleistung der Pumpe angegeben wird, ist dieser Wert um den Wirkungsgrad vereinfacht mit $1/0,9$ zu korrigieren. Im folgenden Beispiel sind das 0,75 kW hydraulische Leistung beziehungsweise 0,83 kW elektrische Leistung. Aus den Betriebsstunden des drucklosen Umlaufs multipliziert mit dem elektrischen Leistungsbedarf der Pumpen in diesem Zustand ergibt sich der elektrische Energiebedarf vor Umsetzung der Maßnahme.

Tabelle 11: Bestimmung des Energieverbrauchs für den drucklosen Umlauf

Bereich	Laufzeit in h im Jahr	Anteil des drucklosen Umlaufs	Betriebsstunden	Elektrische Leistungsaufnahme	Energieverbrauch
Spanabhebung	3.320 h	90 %	2987,7 h	0,83 kW	2490 kWh
Einstellung, Werkzeugwechsel	2.271 h	90 %	2044,3 h	0,83 kW	1704 kWh
Wartezeit	3.145 h	90 %	2830,5 h	0,83 kW	2359 kWh
Summen	leer	90 %	7862,5 h	leer	6552 kWh

Quelle: Abele et alii, 2013, S48

Der Leckagenvolumenstrom vor und nach Umsetzung der Maßnahme wird dann in Bezug zum effektiven Speichervolumen (ebenfalls vor und nach Umsetzung der Maßnahme) gesetzt, um zu errechnen, wie oft der Speicher nach Leckagenvermeidung beziehungsweise Speichervolumenerhöhung während der Nebenzeiten nachgeladen werden muss. In der (verlängerten) Zeitdauer zwischen den einzelnen Ladezyklen kann die Pumpe nun abgestellt werden.

Formel 3 Energieeinsparungsberechnung bei Reduktion der Pumpenlaufzeit

$$\Delta E = P_{UL} * (t_{vorher} - t_{nachher})$$

ΔE : Energieeinsparung [kWh]

P_{UL} : Elektrische Leistungsaufnahme Umlaufpumpe im betrachteten Zustand (druckloser Umlauf) [kW]

t_{vorher} : Laufzeit Pumpe vor Umsetzung der Maßnahmen [h]

$t_{nachher}$: Laufzeit Pumpe nach Umsetzung der Maßnahmen [h]

3.5 Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung

Die Kühlschmierstoffversorgung in Werkzeugmaschinen dient:

- dem **Schmieren**, also der Reduktion der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück durch Bildung eines Schmierfilms, und
- der **Kühlung**, also dem Abtransport von Wärme aus der Kontaktzone und der Werkstückoberfläche. Beim Bohren und Fräsen erfolgt dies über die innere Kühlmittelzufuhr der Spindel.

Weiters haben die Kühlschmierstoffe die Aufgabe, das Werkzeug und das Werkstück zu reinigen sowie die Späne von der Bearbeitungsstelle abzutransportieren. Außerdem dienen sie dem Korrosionsschutz von Werkstück und Maschine (Grindaix GmbH, 2022).

Die Versorgung erfolgt durch Hochdruck- und Niederdruckpumpen, die Anwendung über gerichtete und ungerichtete Düsen oder Kanäle in den Werkzeugen.

Weitere Elemente des Kühlschmierstoffkreislaufs sind die

- Rezirkulation (Hebepumpen, Ölnebelabscheidung) und die
- Konditionierung/Aufbereitung durch Filterung bei Einzel- oder Zentralanlagen über Sedimentieren, Filtern, Zentrifugieren oder Magnetabscheiden und die Temperatursteuerung (Kühlung) des Kühlschmierstoffs.

Generell wird unterschieden in geflutete Kühlung, reduzierte Schmierung und Minimalmengenschmierung (MMS). Bei ersterer wird die Bearbeitungszone mittels Kühlmittelstrahl, der grob auf die Bearbeitungszone ausgerichtet ist, komplett geflutet. 10 bis 100 l/min Kühlmittel sind dafür erforderlich (Madanchi et alii, 2017).

Bei reduzierter Schmierung wird der Kühlmittelstrahl auf die Kontaktzone zwischen Schneidkante und Span mittels Düsen ausgerichtet. Zwischen 50 ml/h und 1 bis 2 l/h werden aufgebracht, von Minimalmengenschmierung (MMS) spricht man bei einer Menge von 50 bis 500 ml/h. MMS benötigt allerdings einen gegebenenfalls höheren Druckluftbedarf und die Reinigungsfunktion ist abgemindert, außerdem können nicht alle Prozessparameter erreicht werden.

3.5.1 Hochdruckpumpen

Je nach Werkzeuggröße beziehungsweise Kühlkanaldurchmesser bestehen unterschiedliche Volumenstromanforderungen, für unterschiedliche Prozesse auch unterschiedliche Druckanforderungen. Bei Werkstück- oder Werkzeugwechseln, sogenannten Nebenzeiten, bleiben die Pumpen eingeschaltet, um kurze Reaktionszeiten zu erreichen.

Die Optimierung ist besonders wirtschaftlich bei:

- Pumpen, die sich lange in drucklosem Umlauf befinden;
- langer Betriebsmittelnutzung;
- Nutzung von Werkzeugen mit unterschiedlichem Kühlkanaldurchmesser und hohem Anteil von Werkzeugen mit kleinem Kühlkanal sowie
- bei der Möglichkeit, Versorgungsdruck in Spanprozessen anzupassen (Abele et alii, 2013).

Bei Nutzung einfacher Regelsysteme fördert ein Motor mit konstanter Drehzahl den gesamten Volumenstrom gegen ein Druckregelventil mit konstant eingestelltem Druck (zum Beispiel 50 bar). Wenn die Durchflussmenge durch ein Werkzeug geringer ist als der von der Pumpe geförderte Volumenstrom, öffnet sich ein Druckbegrenzungsventil und der überschüssige Volumenstrom wird über einen Bypass geführt. Die von der Pumpe bereitgestellte Leistung bleibt daher konstant und ist unabhängig von der tatsächlich erforderlichen KSS-Versorgung (Abele et alii, 2013).

In Nebenzeiten kann die Schmierstoffförderung durch ein spezielles Ventil in den drucklosen Umlauf geschaltet werden; das heißt, dass die Pumpen keinen nennenswerten Druck aufbauen muss. Bei Anforderung von Hochdruck-Kühlschmierstoff (HD-KSS) wird die Druckregelung wieder zugeschaltet (Abele et alii, 2013).

Für die bedarfsgerechte Bereitstellung von Kühlschmierstoff (Druck, Volumen) bietet sich die Anschaffung eines Pumpenmotors mit Drehzahlregelung an. Dabei wird bei kleineren Werkzeugen ein Volumenstrom gefördert, der über die Regelung der Drehzahl an dessen Kühlkanaldurchmesser und damit Kühlschmierstoffbedarf angepasst ist. Durch die Möglichkeit der Druckabsenkung (als Sollwert von der Maschinensteuerung) können bei kleinen Volumenströmen Energieeinsparungen von über 50 % erzielt werden. Durch Anpassung der Maschinensteuerung bleibt die Hochdruckpumpe ausgeschaltet, wenn kein Bedarf für HD-KSS besteht, beispielsweise bei Werkzeugwechsel.

Auch bei bestehenden Anlagen mit Frequenzumrichtern kann durch Anpassung des Volumens und Drucks Energie gespart werden (Beispiele sind Absenkung des Drucks von 12 auf 10 bar beziehungsweise von 60 auf 50 bar oder Anpassung der Ventilschaltpunkte). Durch Kontrolle im NC-Programm, ob Kühlschmierstoff tatsächlich nur während der eigentlichen Bearbeitung gefördert wird, kann ebenfalls Energie gespart werden. Beispielsweise sollte die Schnittfläche nicht zehn Sekunden nach Bearbeitungszeit weiter mit Kühlschmierstoff versorgt werden (Hacksteiner, 2022).

Folgende Komponenten müssen für eine Regelung mit Frequenzumrichter nachgerüstet werden (Abele et alii, 2013):

- Drucksensor (zur Erfassung des aktuellen Drucks)
- Möglichkeit, in der Steuerung Druck-Sollwert über NC-Programm vorzugeben
- Proportional Integral- (PI-)Regler mit Eingang Differenz von Druck-Sollwert und Druck-Istwert, Ausgang Drehzahl-Sollwert an Frequenzumrichter
- Frequenzumrichter

3.5.1.1 Einsparberechnung

Folgende Daten sind für eine Einsparberechnung zu erheben (Abele et alii, 2013):

- Betriebsmittelnutzungszeit: Siehe Tabelle 7
- Anteil der Laufzeiten des HD-KSS-Systems an den einzelnen Betriebszuständen (daraus ergibt sich auch der Anteil des drucklosen Umlaufs); siehe Tabelle 8
- Anteil der Laufzeit des Hochdruck-Kühlschmierstoffsystems an Gesamtzeit des Zerspanungsprozesses (Spanabhebung); Default-Wert: 33 %
- Sollarbeitsdruck und maximaler Volumenstrom der Pumpe (aus Hydraulikplan) zur Errechnung der hydraulischen Leistung (falls nicht verfügbar)
- Wirkungsgrad des Pumpensystems (Default-Wert: 70 %) zur Errechnung der elektrischen Leistung
- Annahme für elektrische Leistungsaufnahmen bei drucklosem Umlauf mit konstantem Fördervolumen (ohne Regelung): 15 % der zuvor berechneten Maximalleistung
- Ermittlung oder Abschätzung des hydraulischen Leistungsbedarfs je nach Werkzeuggröße (Default-Werte siehe Tabellen unten), dazu Einteilung der Werkzeuge je nach notwendigen hydraulischen Leistungsbedarf
- Verteilung des Nutzungsanteils der jeweiligen Werkzeuggröße

Für folgendes Beispiel wurden Betriebszeiten aus der Tabelle angenommen und der Anteil von Zerspanungsprozessen mit eingeschaltetem Hochdruck-Kühlschmierstoffsystem auf ein Drittel (33 %) geschätzt, in allen anderen Fällen ist der drucklose Umlauf aktiviert.

Tabelle 12: Erfassung des Anteils des drucklosen Umlaufs an der Gesamtzeit

Bereich	Betriebsstunden	Anteil druckloser Umlauf
Spanabhebung	3320 h	66 %
Einstellung/Werkzeugwechsel	2271 h	100 %
Wartezeit	3145 h	100 %
Summe	8736 h	leer

Die hydraulische und elektrische Pumpenleistung lässt sich aus den Daten mit folgenden Formeln berechnen:

Formel 4: Hydraulische Pumpenleistung

$$P_{hydr} = \frac{p * \dot{V}}{600}$$

P_{hydr} : Hydraulische Leistung [kW]

p : Systemmaximaldruck [bar]

\dot{V} : Fördervolumenstrom [l/min]

Formel 5: Elektrische Pumpenleistung

$$P_{el} = \frac{P_{hydr}}{\eta}$$

P_{el} : Elektrische Leistungsaufnahme der Pumpe [kW]

η : Wirkungsgrad Pumpe (Annahme: 70 %)

Beispiel: Bei einem Systemdruck von 50 bar, einem Volumenstrom von 35 l/min und einem angenommenen Wirkungsgrad von 70 % ergibt sich eine hydraulische Leistung von $50 \times 35 / 600 = 3,1$ kW und eine elektrische Leistung von $3,1 / 70 \% = 4,4$ kW.

Der Leistungsbedarf für den drucklosen Umlauf (Druckverluste Rohrleitung und Ventile, konstanter Volumenstrom) wird mit 15 % des maximalen Leistungsbedarfs geschätzt ($4,4 \text{ kW} \times 15 \% = 0,66 \text{ kW}$). In der folgenden Tabelle sind die jeweiligen Werte eingesetzt. Mit den Betriebsstunden multipliziert ergibt sich der jährliche Gesamtenergieverbrauch (in diesem Beispiel 9.901 kWh).

Tabelle 13: Errechnung des Energiebedarfs für KSS

Bereich	Laufzeit in h im Jahr	Nutzungsanteil HD-KSS während Zerspanung	Betriebsstunden	Elektrische Leistungsaufnahme	Energieverbrauch
Spanabhebung	3320 h	33 %	1.106 h	4,4 kW	4.866 kWh
Druckloser Umlauf	leer	leer	7.629 h	0,66 kW*	5.035 kWh
Summe	leer	leer	8.736 h	leer	9.902 kWh

* 15 % von 4,4 kW

Quelle: Abele et alii, 2013, S 43

Zur Einsparbewertung durch Frequenzumrichter ist eine Annahme beziehungsweise Erhebung der Nutzungszeiten der unterschiedlichen Werkzeuggrößen während der Spanabhebung erforderlich.

Variante 1 – Abschätzung

Zunächst werden die Werkzeuge je nach erforderlichem hydraulischen Leistungsbedarf eingeteilt. Dazu wird angenommen, dass große Werkzeuge die maximale Leistung der Hochdruckpumpe erfordern. Weiters werden die hydraulischen Leistungsbedarfe in Abhängigkeit der Kühlkanaldurchmesser (in % der maximalen Leistung) für die einzelnen Werkzeuge abgeschätzt. Eine Abschätzung findet sich in der Tabelle.

Tabelle 14: Eigenschaften der unterschiedlichen Werkzeuggrößen für Zerspanung

Bereich	Durchmesser	Kühlkanal-durchmesser	Hydraulischer Leistungsbedarf
Druckloser Umlauf	leer	leer	15 %
Kleine Werkzeuge	Bis 25 mm	25 %	30 %
Mittelgroße Werkzeuge	Bis 63 mm	50 %	70 %
Große Werkzeuge	Ab 63 mm	100 %	100 % (maximal)

Quelle: Abele et alii, 2013

In weiterer Folge wird auf Basis des maximalen hydraulischen Leistungsbedarfs (100 % entspricht 4,4 kW elektrisch) die Leistungsaufnahme während der anderen Betriebszuständen errechnet (zum Beispiel 50 % entspricht 2,2 kW). Die Summe ergibt den Leistungsbedarf nach Optimierung. Es wird, wie schon beschrieben, zu 33 % der Bearbeitungszeit davon ausgegangen, dass die Hochdruck-Kühlschmierstoffpumpe im Einsatz ist. Außerdem wird eine gleichverteilte Aufteilung auf die Nutzungszeit zwischen den Werkzeuggrößen angenommen. Da durch Anpassung der Maschinensteuerung die Hochdruckpumpe ausgeschaltet wird, wenn kein Bedarf für Hochdruck-Kühlschmierstoff besteht, gibt es keinen Leistungsbedarf in dieser Zeit.

Tabelle 15: Leistungsbedarf nach Optimierung

Bereich	Betriebsstunden	Erforderliche hydraulische Leistung	Elektrische Leistungsaufnahme**	Energiebedarf nach Optimierung
Druckloser Umlauf	7.629 h	0 kW	0 kW	0 kWh
Nutzungsanteil kleine Werkzeuge	368,9 h*	50 %	2,2 kW	812 kWh
Nutzungsanteil mittlere Werkzeuge	368,9 h*	70 %	3,1 kW	1.136 kWh
Nutzungsanteil große Werkzeuge	368,9 h*	100 %	4,4 kW	1.623 kWh

* jeweils $3.320:3=1.106,7:3=368,9$

** berechnet aus hydraulischer Leistung

Quelle: Abele et alii, 2013, Seite 45

Aus der Gegenüberstellung der beiden Werte 9.901 kWh und 3.570 kWh ergibt sich die mögliche Einsparung von circa 6.330 kWh (Abele et alii, 2013).

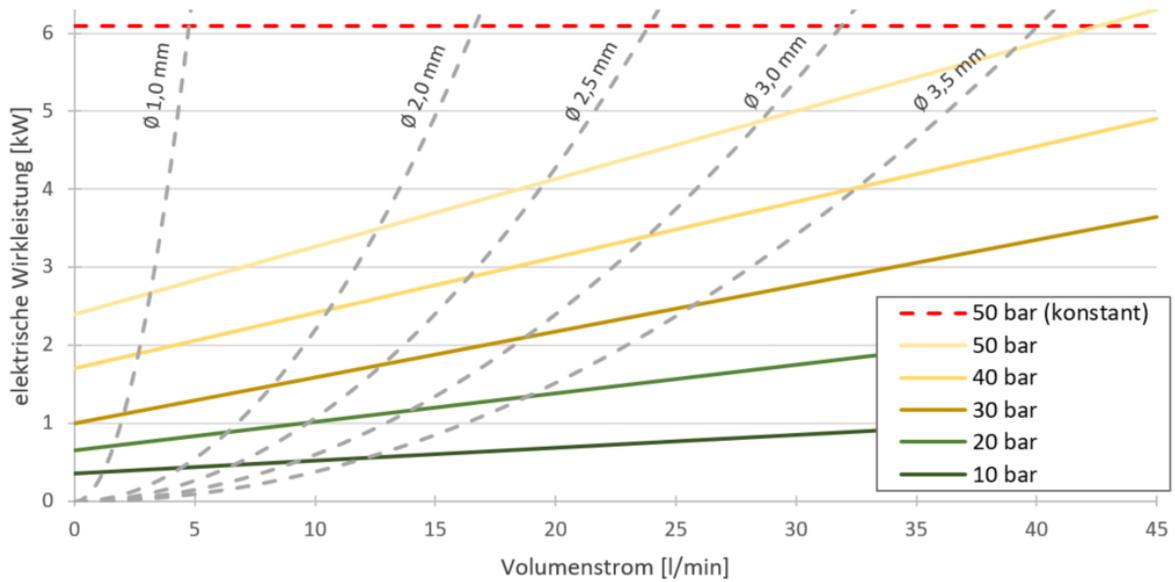
Variante 2 – Pumpenkennlinie

Bei einer genaueren Einsparungsberechnung kann die Leistungsreduktion über das Leistungskennfeld einer drehzahlgeregelten Hochdruckpumpe ermittelt werden, das die elektrische Wirkleistung in Abhängigkeit des Volumenstroms anzeigt.

Zunächst muss die zeitliche Verteilung der Arbeitspunkte der Hochdruckpumpe angenommen werden. In diesem Fall wird die Bearbeitungszeit pro Werkzeuggröße beziehungsweise der erforderliche hydraulische Bedarf (Druck und Volumenstrom) abgeschätzt: zum Beispiel 50 % für den Arbeitspunkt 20 bar, 10 l/min. Für unterschiedliche Werkzeug-Kühlkanaldurchmesser kann der Volumenstrom im Betrieb angepasst werden, für viele Prozesse auch der Druck abgesenkt werden.

Untenstehendes Diagramm zeigt die elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Volumenstroms und des Drucks für eine bestimmte Hochdruckpumpe, zusätzlich sind die Anlagenkennlinien für verschiedene Kühlkanaldurchmesser dargestellt. Die oberste Linie zeigt die Leistungsaufnahme der Pumpe bei konstantem Druck (circa 6 kW).

Abbildung 8: Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Volumenstroms in verschiedenen Druckstufen für Kühlkanaldurchmesser von 1 bis 3,5 mm



Quelle: Vorlage nach Abele et alii, 2013, Seite 55, eigene Darstellung

Aus dem Diagramm können die elektrischen Leistungsbedarfe übernommen werden. Die Werte für 60 bar und 60 l/min wurden geschätzt.

Tabelle 16: Bestimmung der elektrischen Leistung in Abhängigkeit des erforderlichen Drucks und Volumenstroms

Anteil Bearbeitungen, wo Hochdruckpumpen im Einsatz sind	Druck	Volumenstrom	Hydraulische Leistung/ elektrische Leistung (Berechnung über 70 % Wirkungsgrad)	Elektrische Leistung aus Diagramm (teilweise geschätzt)
50 %	20 bar	10 l/min	0,333 kW/ 0,46 kW	1 kW
30 %	30 bar	40 l/min	2 kW/2,9 kW	3,2 kW
10 %	20 bar	60 l/min	2 kW/2,9 kW	3 kW
10 %	60 bar	15 l/min	1,5 kW/2,1 kW	5 kW

Der Vergleich mit der Berechnung über die hydraulische Leistung und den Wirkungsgrad (Variante 1) zeigt, dass die Werte aus dem Diagramm höher sind, besonders für hohe Drücke. Insgesamt ergibt sich im Beispiel (gegenüber der Berechnung) eine Abweichung von circa 40 %.

Verglichen werden diese Werte dann mit dem konstanten Energiebedarf der derzeit laufenden Pumpe (siehe oben).

Weitere Effekte der Optimierung der Pumpenregelung:

- Geringerer Energieverbrauch der Hebepumpe zum Rückfördern des Kühlschmierstoffs aus dem Späneförderer in den Tank
- Geringerer Wärmeeintrag in Fluid, dadurch geringere Kühlung des Schmierstoffs und der Hallenumgebung notwendig

Quelle: Abele et alii, 2013

3.5.2 Optimierung Niederdruckpumpen

Das Niederdruck-Kühlschmierstoffsystem versorgt zum Beispiel:

- Bettspülung beziehungsweise Spänerinne
- Spülung der Werkstückaufnahme
- Arbeitsraumduusche
- Vorlauf zum Hochdrucksystem

Quelle: Abele et alii, 2013

Die Einschaltzeiten und Leistungsbedarfe der Pumpen sind damit teilweise abhängig von der Regelung der Hochdruckpumpen sowie den Einstellungen und Verschaltungen, da diese Pumpen auch den Vorlauf zum Hochdrucksystem bereitstellen.

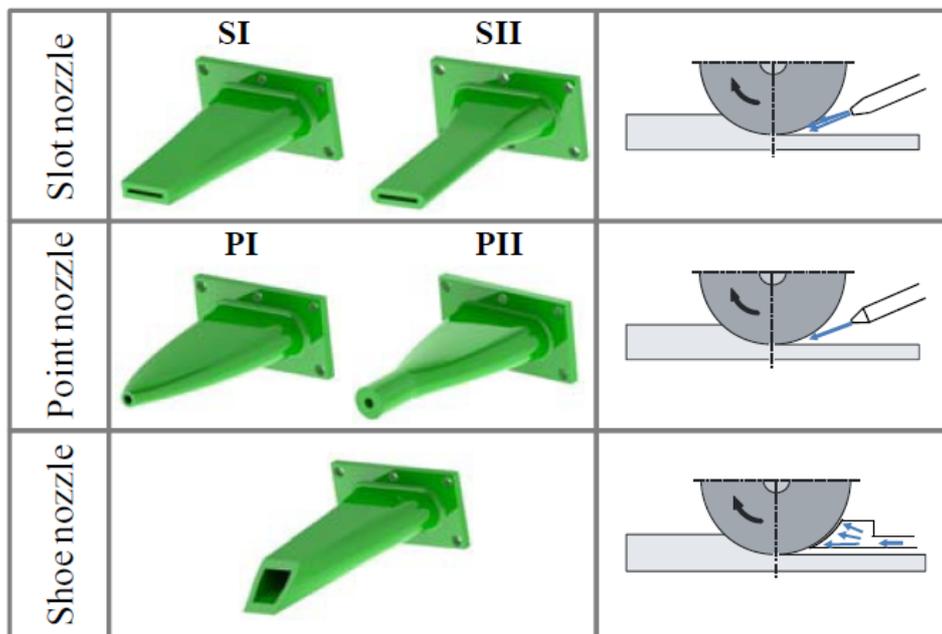
Drehzahlgeregelte Pumpen mit optimierter Auslegung können im Unterschied zur unregelmäßigen Varianten zu hohen Einsparungen führen (Abele et alii, 2013: über 70 %). Ein zusätzlicher Drucksensor überwacht dabei das erforderliche Druckniveau. Falls mehrere Pumpen verbaut sind, kann überprüft werden, ob eine Pumpe ausreichend ist und das Druckniveau vereinheitlicht wird.

3.5.3 Effizienz bei der Kühlschmierstoffversorgung

Besonders bei Schleifprozessen ist aufgrund der hohen Wärmeentwicklung und Reibung auf die Effizienz der Kühlschmierstoffzufuhr zu achten. Düsentyp, -design und -position spielen dabei eine Rolle. Unkontrolliertes Fluten des Spanbildungsbereichs mit Kühlschmierstoff ist nicht optimal.

Für sehr hohe und hohe Volumenströme kommen runde Düsen (Rohre), Schlitzdüsen und Schuhdüsen zum Einsatz, für niedrige Volumenströme sind es Punkt- und Nadeldüsen (für sehr niedrige Sprühdüsen).

Abbildung 9: Verschiedene Ausführungen von KSS-Düsen



Quelle: Madanchi et alii, 2017, Seite 567

Insbesondere Punktdüsen eignen sich für Schleifanwendungen. Im Allgemeinen sollten die Düsen so nah wie möglich an der Schleifscheibe tangential positioniert werden, und zwar in einem Winkel von circa 10° bis 20°. Dadurch kann 23,5 % des Energieverbrauchs der Pumpe eingespart werden (Madanchi et alii, 2017).

3.6 Optimierung des Kühlsystems

Die Hauptaufgabe von Kühlsystemen in Werkzeugmaschinen ist Wärmeabfuhr und damit die Regelung der Temperatur der verschiedenen Komponenten, die Einfluss auf die Maßgenauigkeit des bearbeiteten Werkstücks haben. Die Kühlung verhindert dabei die thermische Längendehnung von Bauteilen und sichert die Funktionalität der Maschine (Denkena et alii, 2020).

Hauptspindel und Lineardirektantriebe werden wassergekühlt betrieben; außerdem werden Kühlschmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten gekühlt, für einige Anwendungen auch Lager, Führungen, Maschinenrahmen und andere Konstruktionselemente. Auch der Schaltschrank mit der Steuerungs- und Leistungselektronik für die Maschine muss gekühlt werden. In vielen Fällen macht das Kühlsystem den größten Teil des elektrischen Energiebedarfs einer Werkzeugmaschine aus, wobei der Kompressor selbst der wesentliche Energieverbraucher ist (Denkena et alii, 2020).

3.6.1 Optimierung der Regelung und Vermeidung von Heißgas-Bypass

Bei einer Maschinenkühlung mit Kaltwasser, das über einen separaten Kältemittelkreislauf gekühlt wird, ist die erforderliche Temperaturhysterese wichtig. Bei Standardanwendungen mit einem Temperaturbereich von $\pm 1,5$ K kann der Kälteverdichter getaktet in Abhängigkeit der Kältemitteltemperatur ein- und ausgeschaltet werden (**Start-Stopp-Regelung**) und durchaus effizient laufen (Abele et alii, 2013).

Für Werkzeugmaschinen zur Durchführung präziser Arbeitsschritte wie Schleifen oder Finishen sind Temperaturanforderungen von $\pm 0,5$ K und darunter erforderlich. Um eine Überhitzung des Verdichtermotors und auch um stärkere Temperaturschwankungen zu vermeiden, wird statt einer zu häufigen Taktung der Kältemittelkreis über **Heißgas-Bypass** (HGBP) geregelt. Dabei läuft der Kompressor immer mit Vollast. Wird eine geringere Kälteleistung benötigt, wird ein Teil des verdichteten gasförmigen Kältemittels zur Temperaturregelung vor dem Verdampfer eingespritzt oder direkt zum Verdichter rückgeführt, also ein Bypass von der Druck- zur Saugseite (Abele et alii, 2013).

Durch einfaches Umstellen der Regelart von Heißgas-Bypass auf Start-Stopp-Betrieb kann der spezifische Energieeinsatz, also das Verhältnis zwischen aufgenommener elektrischer Leistung (P_{el}) zur abgegebener thermischer Leistung (P_{th}) um den Faktor 2 bis 3 verringert

werden (Heißgas-Bypass: P_{th}/P_{el} von circa 1 bis 2; Start-Stopp: P_{th}/P_{el} von 3 bis 4,5). Empfohlen ist aber eine Qualitätsbegleitung, um die Auswirkungen der größeren thermischen Veränderung der Werkzeugmaschine auf die Produktqualität zu beurteilen (Hacksteiner, 2022).

Durch Ausstattung des **Verdichtermotors mit einem Frequenzumrichter** lässt sich circa 70 % der notwendigen Energie gegenüber dem Heißgas-Bypass sparen. Die Einsparungen sind in der Teillast am größten, der Wirkungsgrad nimmt allerdings im niedrigen Drehzahlbereich ab. Die beste Regelbarkeit (mit einer Genauigkeit von 0,5 K) ergibt sich in Kombination mit frequenzgeregeltem Verflüssigerventilator und elektronischem Expansionsventil (Denkena et alii, 2020; Abele et alii, 2013).

Durch einen **digitalen Scroll-Kompressor** lässt sich bei einer Anwendung im Zustand der Spindel bei Volllast 20 % und im Leerlauf 62 % Energie gegenüber der Bypass-Schaltung sparen (Denkena et alii, 2020). Dieser läuft zwar mit konstanter Drehzahl, allerdings verrichtet das Kompressorelement im Leerlauf keine Arbeit, wodurch sich die Leistungsaufnahme auf den Motorleerlauf begrenzt. Die Regelung ermöglicht eine Druckregelung von 10 % bis 100 % (Denkena et alii, 2020).

Als weitere Möglichkeit könnte anstatt über einen Kältemittelkreislauf das Kühlwasser über einen von einem **Ventilator gekühlten Wärmetauscher** gekühlt werden. Auch hier sind Einsparungen von 30 bis zu 70 % möglich.

Als weitere Möglichkeit, die Schalthäufigkeit des Kompressors zu reduzieren und ebenfalls eine hohe Regelgenauigkeit von $\pm 0,5$ K zu erreichen, ist die **Installation eines Speichertanks** für das Kühlwasser. Im Teillastbereich wird ein Teil des Speicherwassers über den Verdampfer geführt und gekühlt und damit der Speicher als Ganzes auf ein bestimmtes Temperaturniveau abgekühlt. Bei dieser Temperatur schalten der Kompressor und der Lüfter ab, der Rücklauf wird durch Beimischung von kaltem Wasser auf die erforderliche Temperatur gekühlt. Erst bei Erreichen der oberen Grenztemperatur im Tank, die jedoch unterhalb der Vorlaufzeittemperatur liegt, schaltet der Kompressor wieder ein. Daraus ergibt sich, dass der Kompressor seltener schaltet, jedoch eine Vorlaufzeit benötigt wird, um die Kühltemperatur im Tank zu erreichen. Falls keine Kühllast anliegt, wird der Tank weiterhin gekühlt. Ein weiterer Nachteil ist der für den Tank benötigte Platzbedarf (Abele et alii, 2013).

Generell können alle Maßnahmen, die den Wärmeeintrag in das System reduzieren, den Energieverbrauch für die Kältebereitstellung senken. Dazu gehört beispielsweise das Abstellen der Kühlschmierstoffpumpe, falls kein Kühlschmierstoffbedarf besteht. Außerdem besteht die Möglichkeit, den Sollwert der Kühltemperatur anzupassen beziehungsweise zu erhöhen. Dadurch wird der elektrische Leistungsbedarf des Kompressors reduziert.

3.6.1.1 Einsparberechnung Kälteregeart

Die Hauptspindel ist für die Auslegung der Kühlleistung das wichtigste Element. Die Maximallast tritt während der Beschleunigung der Spindel auf die Solldrehzahl und beim Abbremsen auf.

Folgende Daten sind für eine grobe Abschätzung des gesamten Energiebedarfs für die Kühlung zu erheben:

- Leistungsbedarf des Rückkühlaggregats im Nennpunkt
- Betriebsmittelnutzungszeit: Siehe Tabelle 7
- Ermittlung des Betriebszustands des Rückkühlaggregats im jeweiligen Betriebsmodus

Quelle: Abele et alii, 2013

Der durchschnittliche Leistungsbedarf eines Rückkühlaggregats kann mit 40 % der erforderlichen Maximalleistung, also der Zeit der Spanabhebung, abgeschätzt werden. Der Leistungsbedarf des Kühlaggregats, wenn die Hauptspindel keine Verlustleistung erzeugt, wird mit 10 % der Maximalleistung abgeschätzt. (Abele et alii, 2013)

Durch Multiplikation der Betriebsstunden mit den jeweiligen Leistungen wird der Energieverbrauch abgeschätzt (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 17: Beispiel für Abschätzung des Energiebedarfs für die Kühlung

Betriebszustände	Betriebszeit	Maximalleistung	Anteil an Maximalleistung	Energieverbrauch (Spalten B × C × D)
Spanabhebung	3.320 h	6 kW	40 %	7.968 kWh
Einstellung/Werkzeugwechsel	2.271 h	6 kW	10 %	1.362 kWh
Wartezeit	3.145 h	6 kW	10 %	1.887 kWh

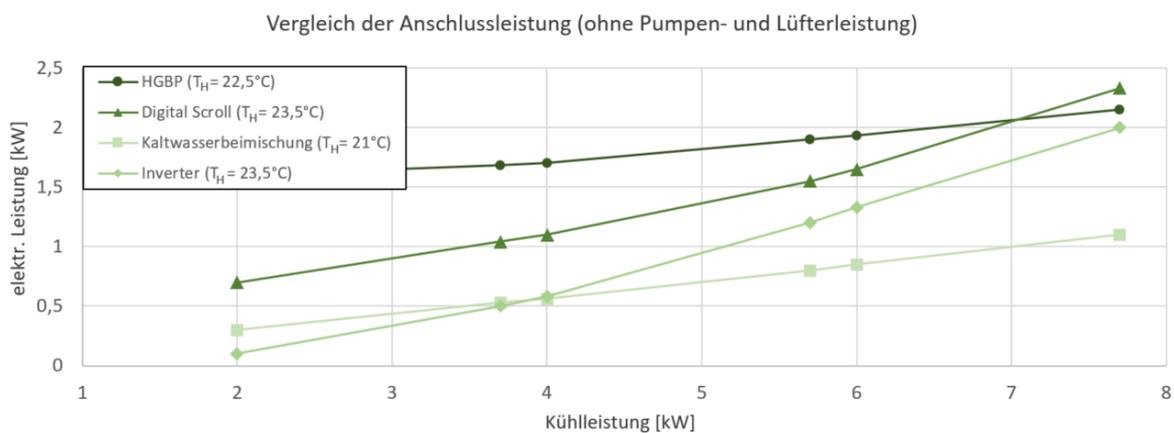
Betriebszustände	Betriebszeit	Maximalleistung	Anteil an Maximalleistung	Energieverbrauch (Spalten B × C × D)
Summe	8.736 h	Keine Summe	Keine Summe	11.218 kWh

Quelle: Abele et alii, 2013

Auf Basis dieses Werts (11.218 kWh) lässt sich grob abschätzen, wie hoch das Einsparpotenzial je nach Ausgangsbasis und vorgeschlagener Maßnahme sein könnte, beispielsweise 30 % bis 70 % dieses Werts.

Abbildung 10 zeigt die elektrische Aufnahmeleistung des Kompressors bei den erläuterten Kompressorregelungen in Abhängigkeit der erforderlichen Kühlleistung. Die Abkürzung HGBP steht für Heißgas-Bypass Regelung, Inverter für Frequenzumrichter.

Abbildung 10: Elektrische Aufnahmeleistung des Kompressors nach erforderlicher Kühlleistung



Quelle: Vorlage nach Abele et alii, 2013, Seite 28, eigene Darstellung

Zur Abschätzung der Einsparung auf Basis dieser Abbildung muss die Dauer der einzelnen Betriebszustände erfasst werden.

3.6.1.2 Einsparberechnung Temperaturanpassung

Die Erhöhung des Sollwerts für die Kühltemperatur führt zu geringerer elektrischer Leistungsaufnahme. Für Kälteaggregate im Zusammenhang mit Werkzeugmaschinen kann

folgende Annahme getroffen werden: Eine Erhöhung der Sollwertvorgabe führt zu einer Energieeinsparung von circa 4 % pro °K. Das heißt, dass die Erhöhung des Sollwerts um 5 °K von 20 auf 25 °C zu einer Energieeinsparung von 20 % führt (Hacksteiner, 2022).

3.6.2 Nutzung der Abwärme

Ein wasserbasiertes Kühlsystem für die Spindel und weitere Anwendungen kann als Basis für die Abwärmenutzung aus einer oder mehreren Werkzeugmaschinen dienen. Die Abwärme kann beispielsweise für Reinigungszwecke für Teile vor der Wärme- oder Oberflächenbehandlung genutzt werden. Während das Kühlwasser auf circa 11 bis 12 °C abgekühlt werden muss, sind für das Reinigungswasser Temperaturen von circa 60 bis 70 °C erforderlich. Da die Prozesse oft nicht zeitgleich stattfinden, ist auch die Installation von Speichertanks erforderlich, falls kein bereits geeignetes System installiert ist. Die Wärmerückgewinnung erfolgt dann über eine Wärmepumpe zwischen den Speichertanks.

Bei einer Anschlussleistung von 6 kW der Werkzeugmaschine kann beispielsweise eine Abwärme von circa 2,7 kW tatsächlich genutzt werden. Über eine Wärmepumpe können dann circa 7,2 kW Wärme bereitgestellt werden. Der Coefficient of Performance (COP) liegt im Bereich von 2,6, ist aber abhängig von den genauen Temperaturniveaus (Junge et alii, 2017). In der Praxis wird dies vor allem für Maschinen mit größerer Leistung durchgeführt, COPs bis zu 4 sind möglich (Hacksteiner, 2022).

Zur genaueren Bewertung einer Wärmepumpe siehe [Klimaaktiv Abwärmeleitfaden](#).

3.7 Weitere Einsparmaßnahmen

Dieses Kapitel beinhaltet ausgewählte weitere Hinweise zu Einsparmaßnahmen, die nicht im Detail beschrieben werden, aber für bestimmte Maschinen von Relevanz sein können.

3.7.1 Späneförderer

Der Späneförderer spielt mit einem Energieverbrauchsanteil von durchschnittlich 6 % zwar nur eine untergeordnete Rolle, dennoch kann auch hier Energie eingespart werden – vor allem bei Schleifmaschinen, wo der Energieverbrauchsanteil auch deutlich über 6 % liegen kann. Gewöhnlich werden Späneförderer kontinuierlich oder in gleichmäßigen Abständen betrieben, ohne die tatsächliche Späneproduktion mitzuberücksichtigen.

Energieeinsparungen können realisiert werden, indem der Späneförderer getaktet ausgeführt wird beziehungsweise abhängig von der Späneproduktion gezielt geregelt wird (Denkena et alii, 2020); siehe auch die Maßnahme „Optimierung des Abschaltmanagements“.

3.7.2 Ölnebelabscheider und Absauganlagen

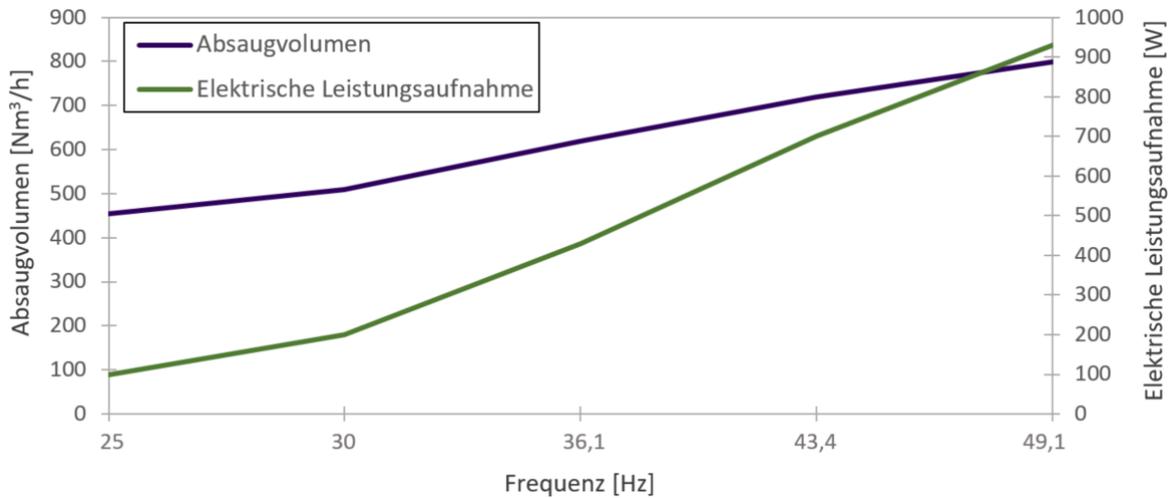
Der Einsatz von Werkzeugmaschinen kann durch das Verdampfen der Kühl- und Schmiermittel zur Verunreinigung der Atemluft und dem Niederschlag von Ölnebel in Produktionshallen führen. Bei zentralen Absauganlagen kann Wärme und Öl wieder rückgewonnen werden.

Doch auch bei bestehenden Anlagen gibt es Verbesserungsmöglichkeiten:

- Steuerung der Einschaltzeiten, zum Beispiel Ausschalten zwei Minuten nach Beendigung des Programms
- Verringerung des Volumenstroms durch Drosselung oder idealerweise durch Einsatz von Frequenzumrichtern
- Einsatz kleinerer Gebläseeinheiten
- Achten auf möglichst kurze Leitungen

In untenstehender Abbildung wurde der Volumenstrom um 22 % reduziert, die elektrische Leistungsaufnahme sank um 56 %.

Abbildung 11: Absenkung der elektrischen Leistung durch Senkung der Absaugleistung



Quelle: Österreichische Energieagentur nach Esslinger, 2022, und e-SimPro

3.7.3 Druckluft

Die Bereitstellung von Druckluft für Lager, Pneumatik und Dichtungsanwendungen erfordert einen erheblichen Teil des gesamten elektrischen Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen (Denkena et alii, 2020). Sie wird auch als Sperrluft zum Schutz von Motoren und Sensoren genutzt.

Die Hauptursachen für den geringen Wirkungsgrad der Druckluftversorgung sind Abwärme und vor allem Leckagen in Anschlüssen, Ventilen und Aktoren (Denkena et alii, 2020).

Die Sperrluftbeaufschlagung der Spindel, das heißt die Erzeugung von Überdruck innerhalb der Spindel zur Vermeidung von KSS und Staub an den berührungslos arbeitenden Labyrinthdichtungen, kann durch berührende Bürstendichtungen vermieden werden. In einem Beispiel entfiel 1,76 Nm³/h Druckluft auf diesen Zweck (Abele et alii, 2013).

Allgemeine Maßnahmen zur Druckluftversorgung siehe [klimaaktiv Druckluftleitfaden](#).

4 Über klimaaktiv

klima**aktiv** ist die Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Seit 2004 bietet sie in den Themenschwerpunkten „Bauen und Sanieren“, „Energiesparen“, „Erneuerbare Energie“ und „Mobilität“ ein umfassendes, ständig wachsendes Spektrum an Information, Beratung sowie Weiterbildung und setzt Standards, die international Vorbildcharakter haben.

klima**aktiv** zeigt, dass jede Tat zählt: Jede und jeder in Kommunen, Unternehmen, Vereinen und Haushalten kann einen aktiven Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Damit trägt die Initiative zur Umsetzung des nationalen Energie- und Klimaplanes (NEKP) für Österreich bei. Näheres unter klimaaktiv.at.

Das klima**aktiv** Programm Energieeffiziente Betriebe setzt gezielt Impulse zur Erhöhung der Energieeffizienz in österreichischen Produktions- und Gewerbebetrieben und unterstützt diese auf ihrem Weg in Richtung Klimaneutralität. Informationen, Angebote und Good-Practice-Beispiele von umgesetzten Maßnahmen finden Sie unter klimaaktiv.at/effizienz.

Kontakt

Strategische Gesamtsteuerung klima**aktiv**

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Sektion VI – Klima und Energie

Stabsstelle Dialog zu Energiewende und Klimaschutz

Stubenbastei 5, 1010 Wien

Programmmanagement klima**aktiv** Energieeffiziente Betriebe

Österreichische Energieagentur, Petra Lackner

eebetriebe@energyagency.at

klimaaktiv.at/effizienz

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beschreibung der unterschiedlichen Energiezustände laut Verband Deutsche Maschinen- und Anlagenbau.....	7
Tabelle 2: Auflistung und Beschreibung der Komponenten einer Werkzeugmaschine	8
Tabelle 3: Einflussfaktoren auf den Energiebedarf	12
Tabelle 4: Typische Energieverbrauchsanteile von Peripheriegeräten.....	15
Tabelle 5: Bewertungsraster zur Vorauswahl der Anlagen.....	19
Tabelle 6: Ermittlung der Bearbeitungszeit nach Werkstücken.....	21
Tabelle 7: Vergleich der zeitlichen Auslastungen nach jährlichen Betriebsstunden	21
Tabelle 8: Ein- und Ausschaltverhalten der Komponenten nach Betriebszuständen.....	22
Tabelle 9: Erfassung von Druck- und Volumsdaten verschiedener Komponenten für Hochdruckkühlschmierstoff	22
Tabelle 10: Zu erfassende Energien und Medien und Parameter laut VDMA 34179.....	26
Tabelle 11: Bestimmung des Energieverbrauchs für den drucklosen Umlauf.....	39
Tabelle 12: Erfassung des Anteils des drucklosen Umlaufs an der Gesamtzeit.....	43
Tabelle 13: Errechnung des Energiebedarfs für KSS	44
Tabelle 14: Eigenschaften der unterschiedlichen Werkzeuggrößen für Zerspanung.....	45
Tabelle 15: Leistungsbedarf nach Optimierung	46
Tabelle 16: Bestimmung der elektrischen Leistung in Abhängigkeit des erforderlichen Drucks und Volumenstroms	47
Tabelle 17: Beispiel für Abschätzung des Energiebedarfs für die Kühlung.....	52

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anteile der Baugruppen am Gesamtenergieverbrauch bei Bearbeitung.....	13
Abbildung 2: Energieverbrauchsanteile nach Komponenten im Betriebszustand „Bearbeitung“ (rote Balken: Peripheriegeräte)	14
Abbildung 3: Aufgenommene Leistung nach Betriebszustand	16
Abbildung 4: Zeitliche Verteilung der Betriebszustände.....	17
Abbildung 5: Energieverbrauchsanteil verschiedener Komponenten von Werkzeugmaschinen	18
Abbildung 6: Qualitative Lastprofile für verschiedene Maschinenkomponenten.....	24
Abbildung 7: Lastprofile eines Drehprozesses	25
Abbildung 8: Elektrische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Volumenstroms in verschiedenen Druckstufen für Kühlkanaldurchmesser von 1 bis 3,5 mm	47
Abbildung 9: Verschiedene Ausführungen von KSS-Düsen.....	49
Abbildung 10: Elektrische Aufnahmeleistung des Kompressors nach erforderlicher Kühlleistung.....	53
Abbildung 11: Absenkung der elektrischen Leistung durch Senkung der Absaugleistung..	56

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des effektiven Speichervolumens.....	37
Formel 2: Berechnung des Leckagenvolumenstroms	37
Formel 3 Energieeinsparungsberechnung bei Reduktion der Pumpenlaufzeit	39
Formel 4: Hydraulische Pumpenleistung	43
Formel 5: Elektrische Pumpenleistung.....	43

Literaturverzeichnis

Abele, E., Dittrich, M., Eisele, C., Kessing, O., Klöblen, W., Rudolph, M., Rummel, W.: Energieeffiziente Produktionsmaschinen durch Simulation in der Produktentwicklung. Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes eSimPro. Darmstadt, 2012

Abele, E., Sielaff, T., Beck, M.: Schlussbericht zum Projekt MaxiEM. Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen. Darmstadt, 2013

Bahmann, W.: Werkzeugmaschinen kompakt. Baugruppen, Einsatz und Trends. 21. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013

Beck, M., Helfert, M., Burkhardt, M., Abele, E.: Rapid assessment: Method to configure energy performant machine tools in linked energy systems. Elsevier, Darmstadt, 2016

Denkena, B., Abele, E., Brecher, C., Dittrich, M.-A., Kara, S., Mori, M.: Energy efficient machine tools. Elsevier, 2020, CIRP Annals, Volume 69, Issue 2, 2020

Denkena, B., Möhring, H.-C., Hackelöer, F., Hülsemeyer, D., Augenstein, E., Nelles, J., Grigoleit, A.: Effiziente Fluidtechnik für Werkzeugmaschinen. Ermittlung und Reduktion des Energiebedarfes am Beispiel des Kühlwassersystems. Springer-VDI, Düsseldorf, 2011

DIN EN 74: Sicherheit von Maschinen. Zweihandschaltungen. Funktionelle Aspekte. zinref.ru/000_uchebniki/04400proizvodstvo/087_DIN-Normen/013.htm, letzter Zugriff: 22.07.2022

Dürr, F., Hacksteiner, M., Holtkemper, D., Losert, B.: eco2production Economical & Ecological Production. Final Report. ecoplus, The Business Agency of Lower Austria, 2015

Effizienzfabrik: EWOTeK Abschlussbericht. effizienzfabrik.de/de/projekte/produktionsmaschinen-detail/ewotek/464/, letzter Zugriff: 22.07.2022

Esslinger, M.: Schriftliche Konversation, EMCO, 20.10.2022. Mündliche Konversation, 17.10.2022 und Vortrag „Energieeffizienz bei Werkzeugmaschinen für spanabhebende Fertigung: Technologien und Optimierungsmöglichkeiten“ bei der klimaaktiv Werkzeugschulung am 18.10.2022

Ferrocontrol Steuerungssysteme GmbH & Co. KG: Intelligent abschalten. Wie man Werkzeugmaschinen energieeffizienter macht. Antriebstechnik 11/2014.
eckelmann.de/fileadmin/user_upload/downloads/News/Publikationen/2014/141106_ferrocontrol_energiemanagement_antriebstechnik_11-14.pdf, letzter Zugriff: 14.10.2022

Fischer R., Linse H.: Elektrotechnik für Maschinenbauer. 14. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012

Grindaix GmbH: Die Kühlschmierstoffversorgung.
<https://grindaix.de/magazin/kuehlschmierstoffversorgung/>, letzter Zugriff: 22.07.2022

Hacksteiner, M., Peherstorfer, H., Bleicher, F.: Energy efficiency of state-of-the-art grinding processes. Elsevier, Vienna, 2018

Hacksteiner, M.: Mündliche Konversation, 17.10.2022, und Vortrag „Energieoptimierung von Werkzeugmaschinen, Erfahrungen aus der Beratungspraxis“ bei der klimaaktiv Werkzeugschulung am 18.10.2022

Heidenhain GmbH: Aspekte der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen.
heidenhain.de/fileadmin/pdf/de/01_Produnkte/Technische_Dokumentation/TI_Energieeffizienz_Werkzeugmaschinen_ID751261_de.pdf, letzter Zugriff: 22.07.2022

Hifi Filter: Filter für Werkzeugmaschinen, hifi-filter.com/de/losungen/werkzeugmaschinen/, letzter Zugriff 21.07.2022

Hirsch, A., Hellmich, A.: Aufbau und Auslegung funktionsbestimmender Werkzeugmaschinen-Baugruppen. In: Neugebauer, Reimund (Herausgeber): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen, Springer Vieweg, Berlin, 2012

Hirsch, A.: Werkzeugmaschinen. Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012

ISO 14955-1:2017(en): Machine tools. Environmental evaluation of machine tools. Part 1: Design methodology for energy-efficient machine tools, 2017,
iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14955:-1:ed-2:v1:en, letzter Zugriff: 21.07.2022

Junge, F., Helfert, M., Abele, E., Vogel, F.: Increase in energy efficiency of industrial production processes through thermal crosslinking of cutting-machine tools and cleaning machines by heat-pump technology, Darmstadt, 2017

Kulterer, K.: Integration von Energie- und Produktionsdaten, Möglichkeit zur Optimierung des Energieverbrauchs durch Nutzung von Produktions- und Energiedaten. klimaaktiv, BMK, 2019

Kulterer, K.: Endbericht zu IEA Energieeffiziente Endverbrauchsgeräte, Annex Elektrische Motorsysteme, Arbeitsperiode 2019–2021. BMK, 2022

Madanchi, N., Winter, M., Thiede, S., Hermann, C.: Energy efficient cutting fluid supply: The impact of nozzle design. Science Direct, The 24th CIRP, Conference of Life Cycle Engineering, 2017. Elsevier, Braunschweig, 2017

Neugebauer, Reimund (Herausgeber): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Springer Vieweg, Berlin, 2012

Pauksch E., Holsten, S., Linß, M., Tikal, F.: Zerspantechnik. Prozesse, Werkzeuge, Technologien. 12. Auflage, Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008

Petruschke, L., Burkhardt, M., Kohne, T., Schraml, P., Helfert, M., Abele, E.: Method to identify energy efficiency potentials of metal cutting machine tools in industry. Elsevier, Darmstadt, 2020

Pottharst, A.: Intelligent abschalten. Wie man Werkzeugmaschinen energieeffizienter macht. Herford, 2014

Redecker, M.: Kenngrößen der Energieeffizienz in der spanenden Fertigung. Graz, 2016

Regel, J., Müller, M.: Ausgewählte spanende Werkzeugmaschinen. In: Neugebauer, Reimund (Herausgeber): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Springer Vieweg, Berlin, 2012

Regel, J.: Einleitung. In: Neugebauer, Reimund (Herausgeber): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Springer Vieweg, Berlin, 2012

Regel, J.: Klassifizierung und Aufbau von Werkzeugmaschinen. In: Neugebauer, Reimund (Herausgeber): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Springer Vieweg, Berlin, 2012

Schischke, K., Hohwieler, E., Feitscher, R., König, J., Kreuschner, S., Wilpert, P., Nissen, N.: Energy-using product group analysis. Lot 5. Maschine tools and related machinery. Task 1 Report – Definition. Fraunhofer, Berlin, 2012

Schischke, K., Hohwieler, E., Feitscher, R., König, J., Kreuschner, S., Wilpert, P., Nissen, N.: Energy-using product group analysis. Lot 5. Maschine tools and related machinery. Task 5 Report – Technical Analysis BAT and BNAT. Fraunhofer, Berlin, 2012

SIGMAtools GmbH: EE4MT – Quickcheck. app.ee4mt.ch/, letzter Zugriff: 22.07.2022

Spanntech GmbH: spanntech.eu/umwelttechnik/oelskimmer-rsk.html, letzter Zugriff 21.07.2022

VDMA 34179: Messvorschrift zur Bestimmung des Energie- und Medienbedarfs von Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung

Vogel GmbH: Grundlagen Hydraulik. Senftenberg, ohne Jahresangabe

Weiss, L.: Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen. iwf.mavt.ethz.ch/ConfiguratorJM/talks/Werkzeugma_132681778231640/iwf_inspire_ee_lw_2011_05_18_final.pdf, letzter Zugriff: 22.07.2022

Wittstock, V.: Mehrmaschinensysteme. In: Neugebauer, Reimund (Herausgeber): Werkzeugmaschinen. Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen. Springer Vieweg, Berlin, 2012

Xu, K., Luo, M., Tang, K.: Machine based energy-saving tool path generation for five-axis end milling of freeform surfaces. Elsevier, Hong Kong, 2016

Abkürzungen

AC	Alternating Current
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CBN	Kubisches Bornitrid; engl. Cubic Boron Nitride
DIN	Deutsche Industrienorm
CNC	Computerized Numerical Control
COP	Coefficient of Performance (Leistungskennzahl)
DC	Direct Current
FU	Frequenzumrichter
h	Stunden
HD	Hochdruck
HSS	High Speed Steel
HSC	High Speed Cutting
ISO	Internationale Organisation für Normung
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KSS	Kühlschmierstoff
l/h	Liter pro Stunde
MES	Manufacturing Execution System
MMS	Minimalmengenschmierung, engl. Minimum Quantity Lubrication
NC	Numerical Control
ND	Niederdruck
Nm³	Normkubikmeter
PI	Proportional Integral
TU	Technische Universität
U/min	Umdrehungen pro Minute
VDMA	Verband Deutsche Maschinen- und Anlagenbau

Anhang

Die wichtigsten technischen Angaben für Werkzeugmaschinen sind in den folgenden Tabellen abgebildet (Beck et alii, 2016; Redecker, 2016, Dürr et alii, 2015).

Tabelle Anhang 1: Allgemeine Maschinendaten

Allgemeine Maschinendaten	Daten	Einheit
Maschinennummer	Auszufüllen	Keine Angabe
Hersteller	Auszufüllen	Keine Angabe
Baujahr	Auszufüllen	Keine Angabe
Anschlussleistung der Maschine	Auszufüllen	kVA oder kW
Verbleibende Lebensdauer	Auszufüllen	Jahre
Wird die Maschine außerhalb der Betriebszeit auf einen Energieeffizienz-Modus (Stand-by, Switch-off) geschaltet?	Auszufüllen	Ja/nein
Einstellungen Stand-by-Manager (Fokus Ausschalten Anlagen)	Auszufüllen	Keine Angabe
Betriebsstunden pro Woche	Auszufüllen	h/Woche
Schichten pro Tag	Auszufüllen	Keine Angabe
Arbeitstage pro Woche	Auszufüllen	Keine Angabe
Betriebszeit (h) – Bearbeitungszeit (h) pro Woche (ergibt non-working time)	Auszufüllen	h

Tabelle Anhang 2: Hauptspindeltrieb

Daten zu Hauptspindeltrieb	Daten	Einheit
Art: Alternating-Current-(AC-) Servo, Direct-Current-(DC-)Nebenschluss, ...	Auszufüllen	Keine Angabe
Anzahl	Auszufüllen	Keine Angabe

Daten zu Hauptspindeltrieb	Daten	Einheit
Leistung	Auszufüllen	kW
Regelung (Frequenzumrichter, FU)	Auszufüllen	Keine Angabe

Tabelle Anhang 3: Vorschubantrieb

Daten zu Vorschubantrieb	Daten	Einheit
Anzahl	Auszufüllen	Keine Angabe
Leistung	Auszufüllen	kW
Art: AC-Servo, DC-Nebenschluss, ...	Auszufüllen	Keine Angabe
Vorschubkraft X/Y/Z	Auszufüllen	N

Tabelle Anhang 4: Hydrauliksystem

Daten zu Hydrauliksystem	Daten	Einheit
Pumpenleistung (Hydraulik)	Auszufüllen	Keine Angabe
Maximaler Druck für Spannmittel (Hydraulik) (30–120 bar)	Auszufüllen	bar
Regelungsart (FU, Start-Stopp ...)	Auszufüllen	Keine Angabe
Elektrischer Leistungsbedarf in drucklosem Umlauf	Auszufüllen	kW
Anteil des drucklosen Umlaufs an Betriebsmittelnutzungszeit	Auszufüllen	Keine Angabe
Speichervolumen	Auszufüllen	l
Speicherfülldruck	Auszufüllen	bar
Unterer/oberer Schaltpunkt	Auszufüllen	bar/bar

Tabelle Anhang 5: Kühlschmierstoffkreis

Daten zu Kühlschmierstoffkreis	Daten	Einheit
Hochdruck-Kühlschmierstoffpumpen E-Motor, Effizienzklasse	Auszufüllen	IE-Klasse (1-5)
Leistung	Auszufüllen	kW
Hochdruck-Pumpenregelung Laufzeit-Programmierung (falls vorhanden: Kennlinienblatt)	Auszufüllen	Keine Angabe
Hochdruck-Kühlmitteldruck (innere Kühlmittelzufuhr): 80–100	Auszufüllen	bar
Hochdruck-Kühlschmierstoff-Versorgungsmenge (Kühlmittel)	Auszufüllen	l/min
Leistungsaufnahme der Pumpe in drucklosem Umlauf	Auszufüllen	kW
Einstellung drucklose Umwälzung/Druckspeicher ...	Auszufüllen	Keine Angabe
Druck/Volumen oder hydraulischer Leistungsbedarf für verschiedene Werkzeugklassen	Auszufüllen	Keine Angabe
Behälterinhalt Kühlmittel	Auszufüllen	l
Niederdruck-Kühlschmierstoff Pumpe (Nennleistung)	Auszufüllen	kW
Regelung Niederdruckpumpe (FU ...), Laufzeitprogrammierung	Auszufüllen	Keine Angabe
Niederdruckpumpe Förderleistung	Auszufüllen	l/min
Niederdruckpumpe Druck	Auszufüllen	bar
Nutzungsanteil verschiedener Werkzeuggrößen (Kühlkanalfläche) an Bearbeitungszeit	Auszufüllen	%

Tabelle Anhang 6: Kühlung

Daten zur Kühlung	Daten	Einheit
Art der Kühlung (zentral/dezentral)	Auszufüllen	Keine Angabe
Anschlussleistung gesamt (Pumpen, Ventilator, Kompressor)	Auszufüllen	kW
Anschlussleistung Kompressor (falls verfügbar)	Auszufüllen	kW
Betriebsmittelnutzungszeit (Laufzeitprogrammierung je nach Betriebszustand)	Auszufüllen	Keine Angabe
Solltemperatureinstellung	Auszufüllen	°C
Art des Kompressors (Kolben, Schraube, Scroll ...)	Auszufüllen	Keine Angabe
Regelung (Heißgas-Bypass, FU, Scroll)	Auszufüllen	Keine Angabe
Speichervolumen	Auszufüllen	l

Tabelle Anhang 7: Pneumatiksystem

Daten zu Pneumatiksystem	Daten	Einheit
Versorgungsdruck	Auszufüllen	bar
Versorgungsmenge	Auszufüllen	l/s
Druckluftkompressor	Auszufüllen	kW
Abschätzung spezifischer Energieverbrauch/Liefermenge	Auszufüllen	kWh/Nm ³

Tabelle Anhang 8: Absaugung

Daten zu Absaugung	Daten	Einheit
Förderleistung Anlage	Auszufüllen	Nm ³ /h
Anschlussleistung Motor	Auszufüllen	kW

Daten zu Absaugung	Daten	Einheit
Details zu Regelung (Frequenzumrichter, Einschaltzeit)	Auszufüllen	Keine Angabe

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)