

Energieeffiziente Produktionsmaschinen Planungshilfen für die MEM-Industrie

Vermeiden von «Betrieb ohne Nutzen»

Vermeiden von «Betrieb ohne Nutzen»

Die Betrachtung des «Betriebs ohne Nutzen» (BON) zielt auf die Vermeidung von Energieverbrauch ohne Wertschöpfung. Die Relevanz des BON für den Energieverbrauch ist über einen längeren Betrachtungszeitraum zu ermitteln.

Zur Reduktion des BON können im einfachsten Fall jene Betriebszustände minimiert werden, die Energieverbrauch verursachen, jedoch keine Wertschöpfung erbringen. Darüber hinaus können mit qualitativen und aufwändigeren quantitativen Analysen Komponenten erkannt werden, welche nicht bedarfsgerecht geregelt sind. Aus Messungen an Werkzeugmaschinen geht hervor, dass der eigentliche Prozess wenig Optimierungspotenzial aufweist. Bei den prozessabhängigen Funktionen und fallweise auch bei den prozessunabhängigen Versorgungsfunktionen besteht hingegen ein grosses Verbesserungspotenzial. Dessen Erschließung bedingt technische Massnahmen, welche nachträglich nur bedingt realisierbar sind.

1. Einleitung

Maschinen und Geräte erzielen den Nutzen durch eine Zielfunktion. Für Produktionsmaschinen ist dies die Herstellung von Waren. Dazu ist Energie notwendig. Wird auch Energie ausserhalb der produktiven Zeit verbraucht, ist die Rede von einem «Betrieb ohne Nutzen», kurz BON. Dieser nicht nutzbringende Verbrauch kann gezielt minimiert werden. Das vorliegende Faltblatt liefert Hilfestellungen und Tipps dazu.

Das generelle Vorgehen zur Analyse und Verbesserung der Energieeffizienz basiert auf der Analyse von verschiedenen Produktionsmaschinen. Es kann auf vielfältige Maschinen und Geräte übertragen werden, sofern die Grundbegriffe, die nachstehend definiert sind, zugeordnet werden können.

Die empirische Grundlage für spezifische Einschätzungen und die Heuristiken wie die Gewichtung der detaillierten Verbesserungspotenziale innerhalb eines Systems gehen auf eine umfassende Analyse von Werkzeugmaschinen zurück. Werkzeugmaschinen sind ortsfeste Produktionsmaschinen zur Bearbeitung von Metall. Sie zeichnen sich durch die Präzision, Vielfalt und Komplexität der gefertigten Teile aus. Sie können unabhängig, als Stand-Alone-Anlagen betrieben werden, oder Teil von grösseren Anlagen sein. Die Datenbasis umfasst die detaillierte Messung und Analyse von zwei Dutzend unterschiedlicher Maschinen. Die daraus gewonnenen Aussagen können als Anregung und Anleitung dienen, sind jedoch gegebenenfalls den Eigenschaften und Umständen der Betrachtungseinheit anzupassen. Der Betrachtungsgegenstand ist praktischerweise in jedem Fall eine physisch überschaubare Einheit.

2. Begriffe und Systemabgrenzung

Effizienz ist nach ISO 9000:2005 (3.2.15) das «Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen». Eine Effizienzberechnung bedingt deshalb die Quantifizierung des Ergebnisses und der Ressourcen, durch Messung, Berechnung oder Schätzung.

Um die Energieeffizienz zu ermitteln, sind einzig die Ressourcen an Energie zu erfassen. Dies ist messtechnisch je nach Maschine oder Gerät mehr oder weniger aufwändig. Die Versorgung mit elektrischer Energie kann mit wenig Aufwand genau gemessen werden. Für die Messung von Druckluft, Kühlwasser, Luftströmen und anderen Energieflüssen sind die Messgeräte teurer, ungenauer und die Messungen sind aufwändiger. Dies ist ein Grund dafür, dass das Bewusstsein für den Energieverbrauch bei diesen Energieformen deutlich geringer ist.

Grundsätzliche Schwierigkeiten ergeben sich bei der Quantifizierung des Ergebnisses. Für Vergleichszwecke wird deshalb oft ein bestimmtes, einfach zu überprüfendes Ergebnis festgelegt. Für vergleichende Betrachtungen wird ein solches Ergebnis, zum Beispiel ein bestimmter Prozessablauf oder ein hergestelltes Teil, vorausgesetzt. Selbstredend wird davon ausgegangen, dass Modifikationen an der Maschine resp. dem Gerät dieses Ergebnis nicht verändern.

Einfachere Verhältnisse ergeben sich für die eingeschränkte Betrachtung von Betrieb ohne Nutzen. In diesem Fall ist der Nutzen, d. h. das Ergebnis definitionsgemäss Null; jegliche eingesetzte Ressourcen sind in diesem Fall Verschwendung und tragen zur Ineffizienz bei.

In gewisser Weise greift diese Betrachtung jedoch zu kurz. Ergebnis und Nutzen sind generelle Begriffe, deren Quantifizierung vielfältig sein kann. Eine Produktionsmaschine, die rund um die Uhr identische Waren von geringem Wert produziert, wird weniger wirtschaftlichen Nutzen erzeugen als eine Maschine, die flexibel, je nach Bedarf variierende Waren in den gewünschten Mengen und zu einem bestimmten Zeitpunkt herstellen kann. Eine solche Maschine wird Umrüst- und logistisch bedingte Stillstandszeiten aufweisen, die in Kauf genommen werden, weil sie offenbar den Nutzen insgesamt steigern. Zumindest ein Teilnutzen kann diesen unproduktiven Betriebszuständen zugewiesen werden.

Maschinen und Geräte verfügen über eine Vielzahl von **Betriebszuständen**, welche für eine praktische Betrachtung auf drei reduziert werden können:

- A) In Betrieb mit Zielfunktion, Prozess läuft, nachstehend **«Produktion»** genannt
- B) Betriebsbereit, Betrieb mit Teilnutzen, nachstehend **«Betriebsbereit»** genannt
- C) **«Aus»**

Im Gebäudebereich wird von **Anwesenheits- und Bedarfsgerechtigkeit** gesprochen: Eine Funktion soll nur erbracht werden, wenn sie nötig ist, und wenn, dann nur soviel wie nötig. Diese beiden Begriffe sind auf produktive Maschinen und Geräte respektive auf deren Regelung und die ihrer Komponenten übertragbar. Sie werden deshalb in der Folge als etablierte Begriffe verwendet, auch wenn sie aus einem anderen Kontext stammen und im übertragenen Sinn verstanden werden müssen.

- Anwesenheitsgerecht: die Funktion wird nur erbracht, wenn sie benötigt wird
- Bedarfsgerecht: die Menge wird dem Bedarf angepasst

Bild 1 zeigt die **Systemgrenzen der Energiebetrachtung** einer Produktionsmaschine und deren Erweiterung um den Materialfluss. Für den Betrieb ohne Nutzen wird nur die Energie, d. h. die obere Hälfte des Bildes, betrachtet. Der Verbrauch von Hilfsstoffen oder von Rohmaterial, z. B. beim Einfahren eines Prozesses, könnte auch von Interesse sein; an dieser Stelle wird darauf aber nicht vertieft eingegangen.

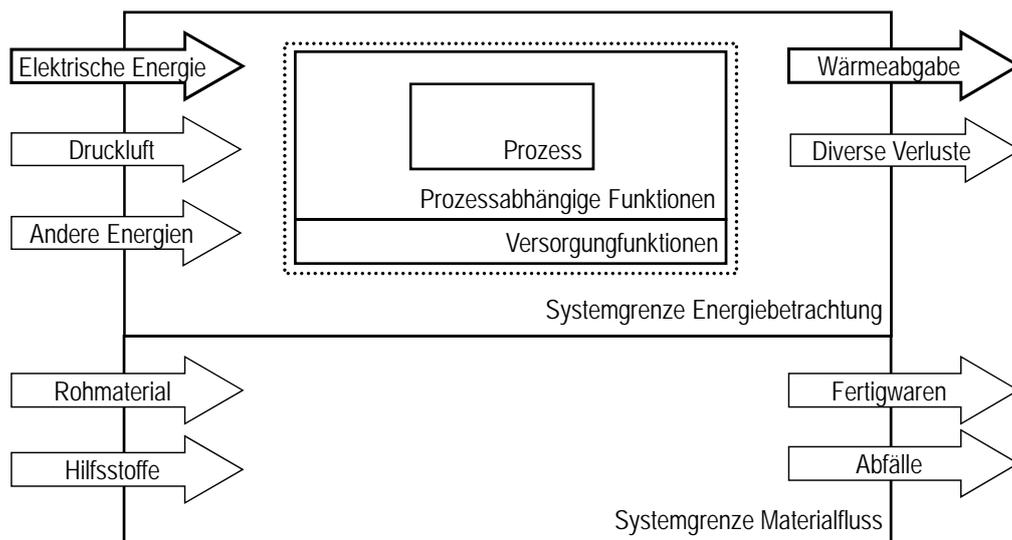


Bild 1: Vereinfachte Systemgrenzen von Maschinen und Geräten

Innerhalb der betrachteten Einheit (vgl. Bild 1) wird in der Folge die benötigte Energie drei Bereichen zuge-
teilt:

- a) dem **Prozess**
- b) den **prozessabhängigen Funktionen**
- c) den **Versorgungsfunktionen**

Der **Prozess** ist die Energieumwandlung, welche im Zentrum steht und welche den Nutzen, die Menge, die Qualität und andere Kenngrößen im Wesentlichen bestimmt. Bei einem mechanischen Prozess wird von einem Hauptantrieb gesprochen, die weiteren Funktionen sind Nebenantriebe.

Prozessabhängige Funktionen sind notwendig in dem Mass, in dem der Prozess stattfindet, typischerweise zur Kühlung oder Konditionierung der Prozesszone, zur Zufuhr von Rohmaterial und Hilfsstoffen, und zum Entfernen von Fertigwaren und Abfällen.

Versorgungsfunktionen sind vom Prozess weitgehend unabhängig. Ihre Versorgung erfolgt nach vorgegebenen Werten. Beispiele sind die Gleichspannungsversorgung der Sicherheitsschaltkreise oder Sperrluft zum Schutz von schmutz- oder feuchtigkeitsempfindlichen Komponenten.

3. Bestimmung der Relevanz

Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz, wie die Optimierung des Betriebs ohne Nutzen, sollen sich wirtschaftlich lohnen. Deshalb muss vor der Implementierung von Massnahmen die **Relevanz**, also die absolute und die relative Bedeutung des Betriebs ohne Nutzen geklärt werden. Hierfür muss der Energieverbrauch in den verschiedenen Betriebszuständen über einen repräsentativen Zeitraum mit einem **Einsatzszenario**, welches der typischen Nutzung entspricht, berechnet werden.

Der sinnvolle **Betrachtungszeitraum** ist ein Jahr, um saisonale Schwankungen des Arbeitseinsatzes, des Marktes und der Temperaturen mit einbeziehen zu können. Es ist notwendig, die der Maschine zugeführte Energie in den verschiedenen Betriebszuständen zu messen. Der **Messzeitraum** kann kürzer gewählt werden. Sinnvoll ist eine Woche, um die drei genannten Betriebszustände zu erfassen.

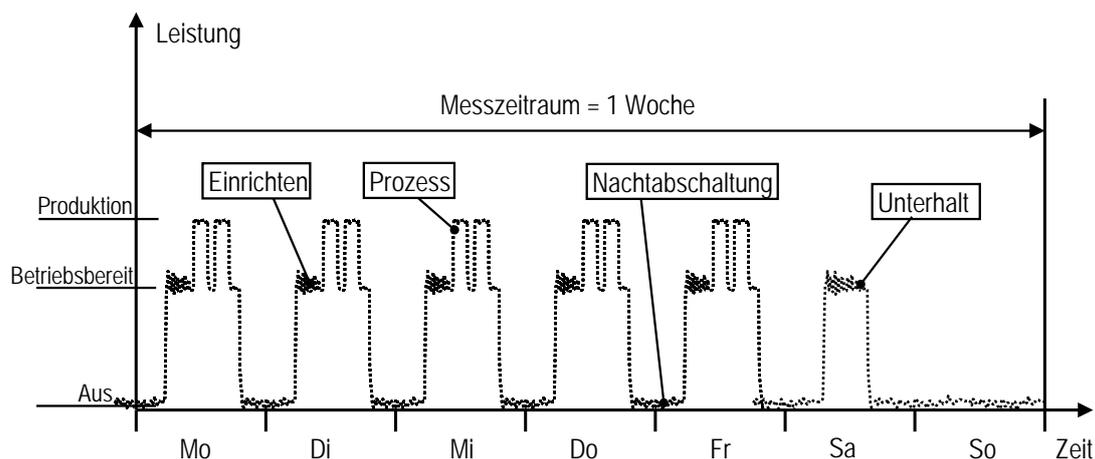


Bild 2: Exemplarisches Beispiel des Leistungsverlaufs einer Maschine

Bild 2 zeigt den typisierten Leistungsverlauf einer Maschine über einen Messzeitraum von einer Woche. Es sind drei Leistungsstufen erkennbar, welche den Zuständen «Produktion», «Betriebsbereit» und «Aus» zugewiesen werden, unabhängig davon, welche Aktivität im Zustand «Betriebsbereit» ausgeführt wird. Die Hochrechnung des Anteils der Betriebszustände auf ein Jahr, zusammen mit den gemessenen Leistungsstufen, lässt die Bedeutung der Betriebszustände erkennen.

Tabelle 1: Berechnung der Relevanz der Betriebszustände

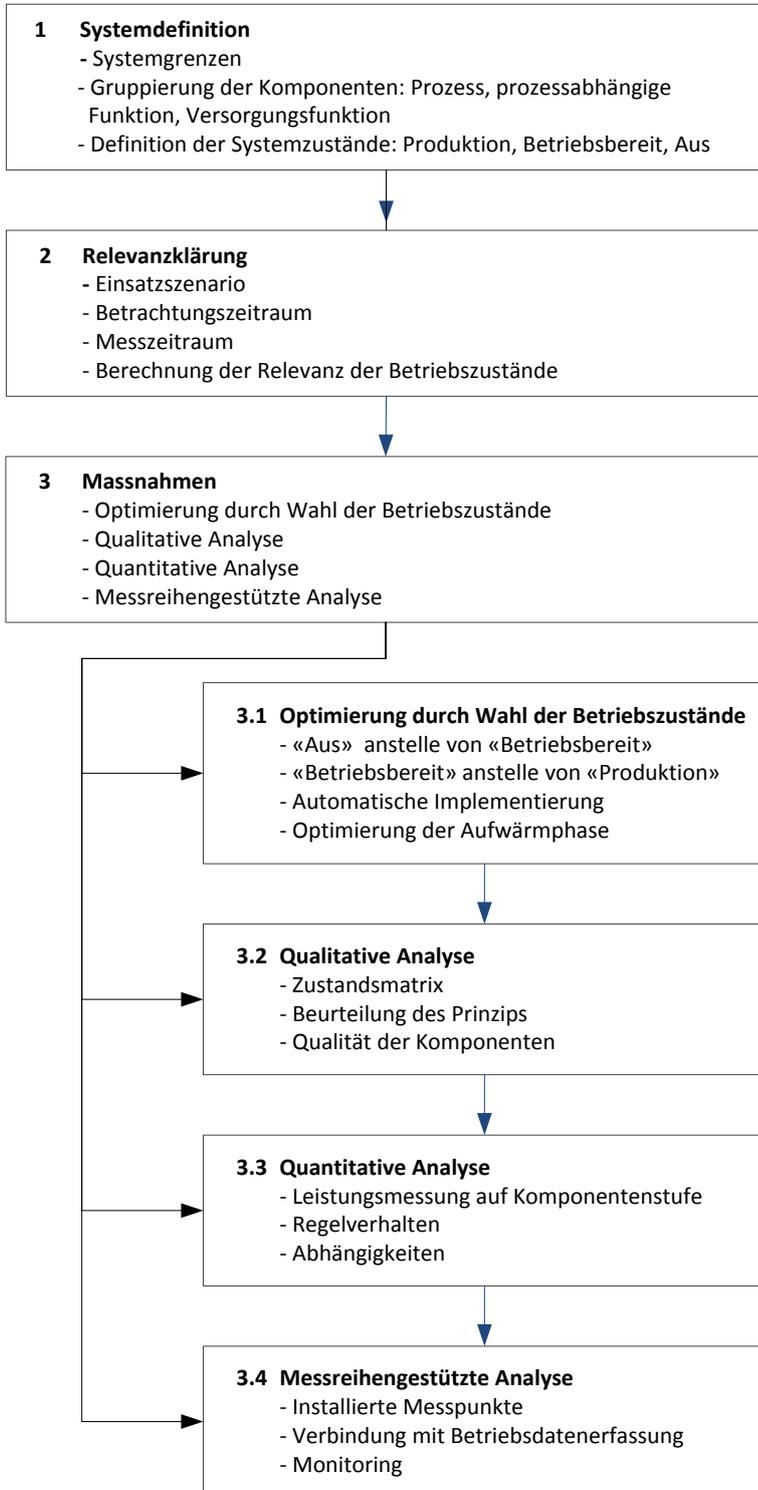
	Betriebszustand			Total
	Produktion	Betriebsbereit	Aus	
Zeitanteil	20%	30%	50%	100%
Stunden pro Jahr	1752	2628	4380	8760
Typische Leistungsstufe	20 kW	13kW	0.2kW	
Energie / Jahr	35'040 kWh	34'164 kWh	876 kWh	70'080 kWh
Energieanteil	50%	49%	1%	100%
Energiekosten @ 0.15 CHF / kWh	5'256 CHF	5'125 CHF	131 CHF	10'512 CHF

Der Zustand «Betriebsbereit», das klassische Feld zur Optimierung des Betriebs ohne Nutzen, sticht in diesem Beispiel hervor, während im Zustand «Aus» das Potenzial trotz des hohen Zeitanteils verhältnismässig gering ist. Der absolute Betrag zeigt auf, welche Kosten für allfällige technische Massnahmen in Frage kommen, um auch wirtschaftlich interessant zu sein. In aller Regel sind die Kosten zu gering, um eine proaktive technische Modifikation alleine wirtschaftlich zu begründen. Eine andere Situation liegt vor, wenn ohnehin Reparaturen oder Wartungsarbeiten ausgeführt werden müssen und für Massnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz nur die Marginalkosten anfallen.

4. Ableiten von Massnahmen

Zur Analyse und Vermeidung von BON kann nach dem folgenden Flussdiagramm vorgegangen werden.

BON – Generelles Vorgehen



Im Folgenden werden die einzelnen Massnahmen detailliert beschrieben.

3.1 Optimierung durch Wahl der Betriebszustände

Die naheliegende Optimierung ist die **Wahl des Betriebszustands** «Aus» anstelle von «Betriebsbereit». Dies kann durch betriebliche Massnahmen oder durch technische Vorkehrungen bewerkstelligt werden, was in jedem Fall besser, da automatisch ist. Bedingt ist auch der Rückfall von «Produktion» in den Zustand «Betriebsbereit» möglich, wenn der Prozess kurzzeitig unterbrochen wird, beispielsweise für ein Werkstückhandling. Solche Massnahmen sind sinnvoll, wenn sie programmiert oder automatisiert werden können. Sonst werden sie in der Praxis nicht umgesetzt.

Der Wechsel zwischen den Zuständen «Betriebsbereit» und «Aus» kann eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen, beispielsweise zum Erreichen eines Temperaturgleichgewichts oder zum Herunterfahren einer Steuerung. Dies ist der wichtigste Grund, weshalb Betrieb ohne Nutzen so häufig ist. In einzelnen Fällen kann ein forciertes Zustandswechsel auch die Lebensdauer beeinträchtigen. Bei modernen Maschinen und Geräten ist dies jedoch weniger der Fall.

Jede weitere Möglichkeit zur Vermeidung des Betriebs ohne Nutzen bedingt Veränderungen im Aufbau der Maschine. Bei Neukonstruktionen resp. bei Beschaffungen ist der zeitlichen Dauer von Zustandsänderungen die entsprechende Beachtung zu schenken. Geeignet ausgelegte Stand-By-Funktionen können diese Zeiten erheblich verkürzen.

3.2 Qualitative Analysen

Mit einer qualitativen Analyse sollen Möglichkeiten zur Energieoptimierung erkannt werden, ohne dass detaillierte Messungen notwendig sind. In vielen Fällen kann damit ein Grossteil des Potenzials erkannt und realisiert werden. Unumgänglich ist eine Analyse der Subsysteme und der Bauteile, die nachstehend als **Komponenten** zusammengefasst werden. Folgende Vorgehensweisen bieten sich dabei an:

- Aufstellen der **Zustandsmatrix**: Welche Komponenten sind in welchem Betriebszustand aktiv?
- **Beurteilung des Prinzips**: Ist das angewandte Prinzip zur Realisierung einer Funktion sinnvoll?
- **Qualität der Komponenten**: Entsprechen die verwendeten Komponenten dem Stand der Technik?

Eine qualitative Massnahme orientiert sich nicht nur an den «üblichen Verdächtigen», wie sie beispielsweise in Form einer Checkliste der Norm ISO DIS 19455-1 (im Entwurfsstadium) entnommen werden kann. Sie zielt vor allem auch darauf ab, Fehlanpassungen in der Anwendung zu erkennen. Oft werden Produktionsmaschinen nicht in jeder Hinsicht so eingesetzt, wie sie ursprünglich vorgesehen waren. Dies kann zu Ineffizienz führen, die bereits mit einer qualitativen Analyse erkannt werden kann.

3.3 Quantitative Analysen

Eine weitergehende Systemanalyse bedingt Messungen bis auf Komponentenstufe. Bild 3 zeigt den Leistungsverlauf bei einem Fräsprozess, wobei mehrere Komponenten einzeln gemessen und akkumuliert dargestellt wurden. Bild 4 zeigt einen Ausschnitt, in dem das Verhalten von einzelnen Komponenten erkennbar wird. Mit einer detaillierten Komponentenmessung wird die Information, welche durch eine qualitative Analyse (siehe 3.2) gewonnen wird, für die gemessenen Betriebszustände direkt ersichtlicher. Augenfällig ist das Regelverhalten von verschiedenen Komponenten mit diskreten Stufen.

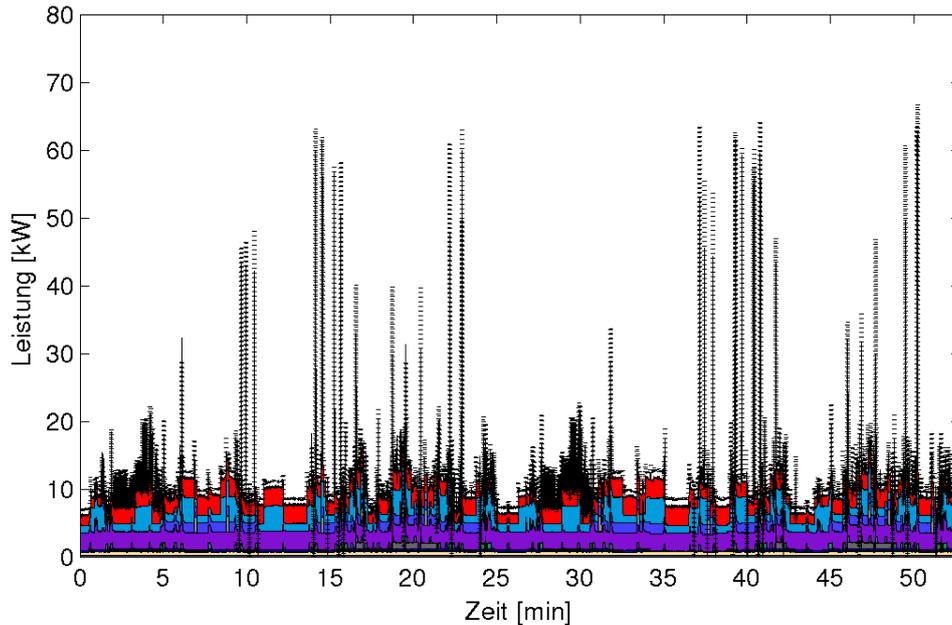


Bild 3: Leistungsverlauf bei einem Fräsprozess mit hohen Leistungsspitzen beim Anfahren der Spindel nach einem Werkzeugwechsel, Übersichtsdarstellung

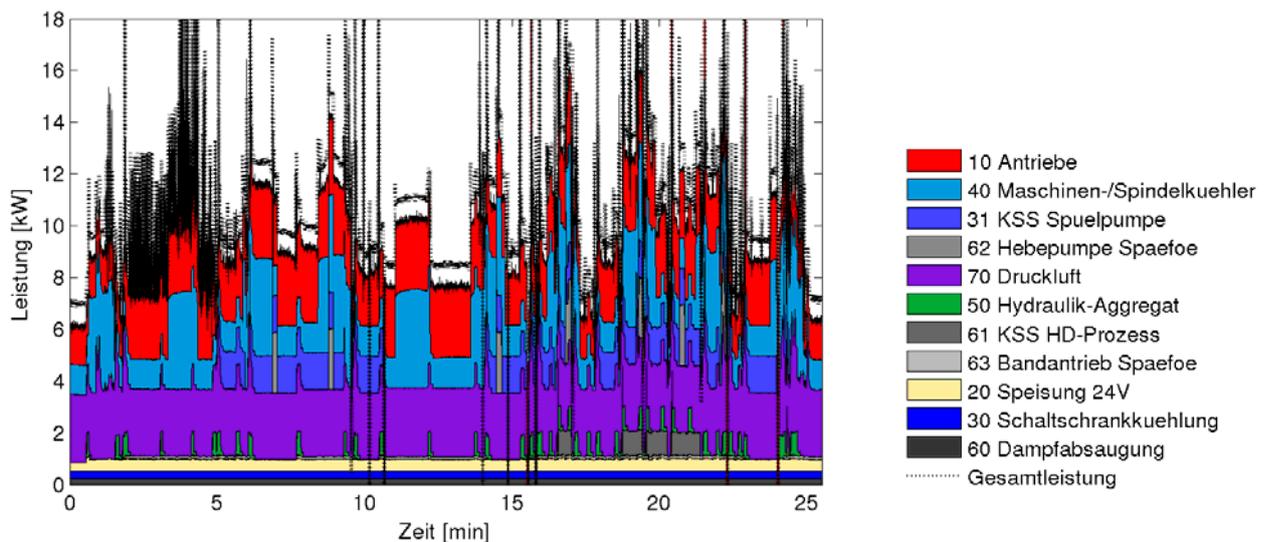


Bild 4: Leistungsverlauf von Maschinenkomponenten bei einem Fräsprozess, Ausschnitt

3.4 Messreihengestützte Analyse zur Erkennung von Abhängigkeiten

Die Schwäche einer punktuellen quantitativen Analyse ist ihre mangelnde Repräsentativität, beispielsweise bei stark unterschiedlichen Umgebungstemperaturen im Jahresverlauf. Bei grösseren Anlagen kann die Installation von Messpunkten zum kontinuierlichen Monitoring den Weg für eine weitergehende Erkennung von Abhängigkeiten eröffnen.

5. Beispiele für Analyse und Massnahmen

Empirische Erkenntnisse

Aufgrund der empirischen Untersuchung von Werkzeugmaschinen kann über die Bedeutung der drei Bereiche

- Prozess
- Prozessabhängige Funktionen
- Versorgungsfunktionen

eine generelle Aussage gemacht werden. Sie gilt praktisch unabhängig von der Prozessgestaltung, ob es sich um eine klassische Zerspanung mit Kühlschmiermittel, eine Trockenzerspanung, einen elektrochemischen Prozess oder um Laserbearbeitung handelt. Unterschiedlich ist allenfalls die Funktion, beispielsweise der Kühlung, ob diese direkt den Prozess, und/oder Maschinenkomponenten kühlt.

Die Prozessleistung ist in den Abbildungen jeweils rot eingefärbt, der prozessabhängige Kühlaufwand blau und die verschiedenen Versorgungsfunktionen in anderen Farben.

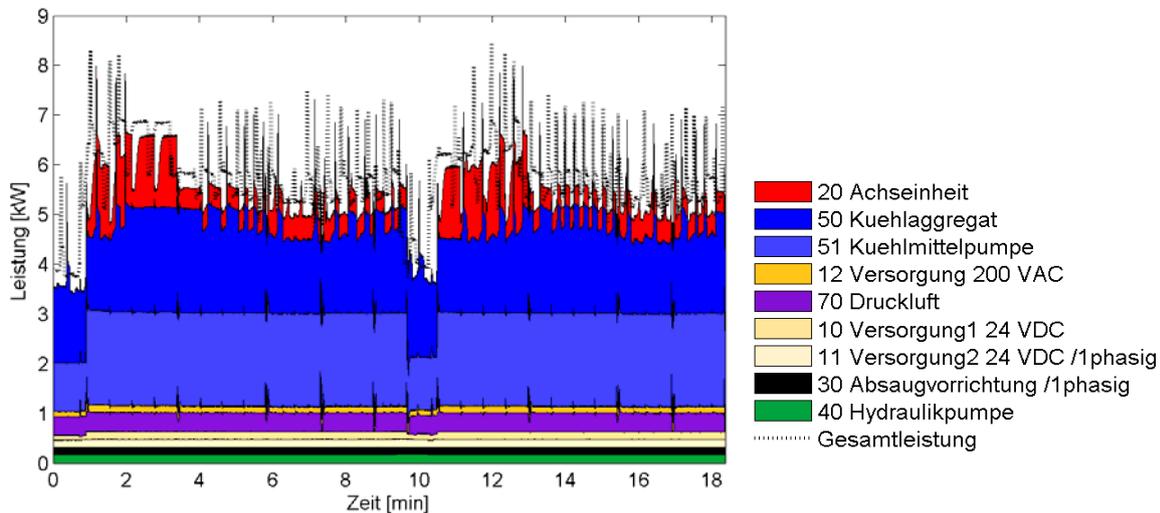


Bild 5: Leistungsverlauf einer kleinen Schleifmaschine im Prozess mit Kühlschmiermittel

Vorangehend wurde in Bild 2 und in Bild 3 ein typischer Leistungsverlauf eines Fräsprozesses auf einem Bearbeitungszentrum gezeigt. In Bild 5 ist der Leistungsverlauf einer kleinen Schleifmaschine im Prozess mit Kühlschmiermittel dargestellt. Augenfällig ist der grosse Leistungsanteil für die Prozesskühlung. Demgegenüber ist das Laserschneiden (Bild 6) ein trockener Prozess. Dennoch wird, wie Bild 6 zeigt, ein grosser Anteil der Leistung zur Kühlung aufgebracht, in diesem Fall zur Kühlung der Laserkomponenten. Die nachstehenden Aussagen sind aus einer grossen Zahl derartiger Messungen abgeleitet.

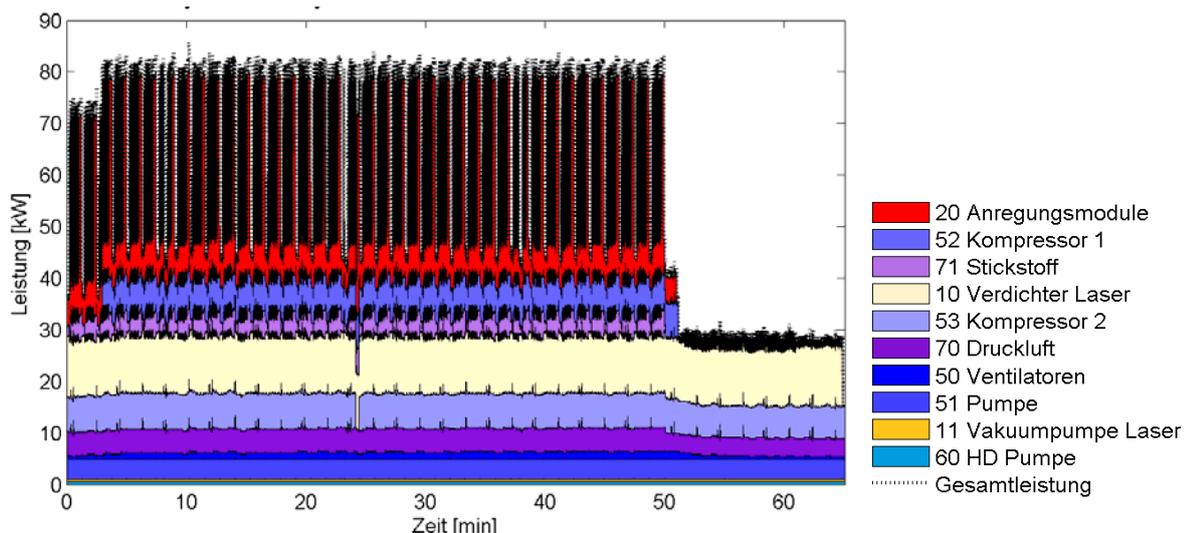


Bild 6: Leistungsverlauf einer Laserschneidmaschine im Prozess

Der **Prozess** hat einen Anteil von rund einem Drittel der gesamten Energieaufnahme. Die Prozessantriebe und Aggregate sind in der Regel gut optimiert. Dies ist auf langjährige Anstrengungen zur Verbesserung zurückzuführen. Das Optimierungspotenzial für diesen Bereich ist deshalb relativ gering, ausser der Prozess

als solcher wird grundsätzlich verändert, z. B. Trockenbearbeitung anstatt Bearbeitung mit Kühlschmiermittel.

Ideale Eingriffsmöglichkeiten sind deshalb:

- Die **prozessabhängigen Funktionen**. Sie sind zusammen genommen der grösste Block und im Einzelnen oft nicht optimiert. Von diesem Bereich kann der grösste Beitrag zur Optimierung insgesamt erwartet werden. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass die Komponenten vielfältig sind und sehr unterschiedlichen Funktionen dienen.
- Die **Versorgungsfunktionen**. Ihr Anteil an der Leistungsaufnahme ist geringer. Sie werden wenig beachtet und sind deshalb fallweise weder anwesenheits- noch bedarfsgerecht geregelt. Trotz des geringen Anteils an der Leistungsaufnahme kann gerade bei einem hohen Anteil unproduktiver Zeiten ein mittleres Optimierungspotenzial resultieren.

Diese Aussagen sind in **Tabelle 2** übersichtlich zusammengestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der Leistungsanteile und des Optimierungspotenzials bei Werkzeugmaschinen

	Beispiele	Relevanz	Optimierungspotenzial Bereich	Optimierungspotenzial insgesamt	Mögliche technische Lösung
Prozess	Spindel, Hauptantrieb	••	•	•	Erhöhung der Geschwindigkeit, Erhöhung der Prozessleistung
Prozessabhängige Funktion	Kühlschmiermittelpumpe	•••	•••	•••	Prozessabhängige Regelung
Versorgungsfunktionen	24V-Versorgung, Hydraulik für Spannelemente	•	(•••) Fallweise gross	(••) Fallweise	Effiziente Komponenten, Bedarfsgerechtigkeit

Checklisten für metallbearbeitende Maschinen

Im Laufe einer Maschinenentwicklung können Massnahmen, die in Form von Checklisten vorliegen, überlegt und gegebenenfalls implementiert werden. Die wenigsten Massnahmen sind vorbehaltlos umzusetzen, da Aufwand und Effekt im Kontext beurteilt werden müssen. Der Normentwurf **ISO/DIS 14955-1** enthält Checklisten für Maschinen zur Metallbearbeitung durch Zerspanen oder Umformen. Einige Punkte, die spezifisch BON betreffen, sind nachstehend summarisch wiedergegeben.

Anforderung	Massnahme	Kommentar
Kurze Aufwärmzeiten	Strukturoptimierung oder automatische Temperaturkompensation	Systematische thermische Auswirkungen können modelliert und entsprechend kompensiert werden.
Unbewegte Achsen ohne Leistungsaufnahme	Achsen, die sich im Stillstand befinden, werden arretiert	
Einfaches Ein- und Ausschalten	Intelligente Hoch- und Niederfahrtroutinen	Komplexe Prozeduren zum Hoch- und Niederfahren von Anlagen halten Anwender davon ab, eine Anlage bei temporärem Nichtgebrauch auszuschalten.
Minimierung unproduktiver Zeiten	Durch die Reduktion unproduktiver Zeiten wird BON verringert.	Unproduktive Zeiten werden allein schon aus wirtschaftlichem Interesse minimiert.
Energieoptimierte Parametersätze	Durch Vorgabe von Festwerten werden die verschiedenen Betriebszustände energieoptimiert.	Implementation in der Maschinensteuerung
Dynamische Energieoptimierung	Mittels adaptiver Regelung wird BON erkannt. Es wird der energiegünstigste Betriebszustand angefahren.	Problematisch sind Aufwärm- und Abkühlphasen, wenn die Vorgeschichte und/oder die Planung berücksichtigt werden muss.
Automatische Wahl des Betriebszustands	In typischen Situationen wird automatisch der bestmögliche Betriebszustand angefahren.	Die Möglichkeiten zur Typisierung von Situationen sind begrenzt, z. B. Ausschalten nach Ablauf eines Fertigungsprozesses in mannlosem Betrieb.
Druckluftsystemverluste minimieren	Anlageteile, die nicht benutzt werden, sollten ausgeschaltet werden können.	BON-Optimierung setzt gezielte Eingriffsmöglichkeiten voraus.
Bedarfsgerechte Kühlung/Schmierung	Bedarfsgerechte Regelung von Druck und Durchfluss des Kühlschmiermittels sowohl nach Kühl-, wie nach Schmierbedarf.	Die Doppelfunktion des Kühlens und des Schmierens ist zur Optimierung getrennt zu betrachten. Bei vorwiegendem Schmierbedarf kann eine Ölnebelschmierung («Minimalmengenschmierung») vorteilhaft sein.
Bedarfsgerechte Maschinenkühlung	Regelbarer Durchfluss von Kühlkreisläufen, z. B. temperatur-abhängig.	Eine geregelte Kühlung erhöht meist auch den Nutzen durch stabilere Produktionsbedingungen. Kleinere, gut regelbare Kühlsysteme können mit Peltier-Elementen realisiert werden.
Auslegung hydraulischer Systeme	Hydrauliksysteme sind so zu gestalten, dass BON optimiert werden kann.	Analyse und Simulation des erwarteten System-verhaltens in der Entwicklung ermöglichen eine bedarfsgerechte Auslegung. Systeme können nur geregelt werden, wenn sie entsprechend ausgelegt sind.
Abstimmung des Druckniveaus von Hydraulikkomponenten	Druckreserven minimieren und Komponenten mit gleichem Nenndruck verwenden.	Druckreserven und unterschiedlicher Nenndruck komplizieren die Auslegung und reduzieren die Möglichkeiten für eine betriebliche Optimierung. Falls unabdingbar, zwei Versorgungssysteme mit unterschiedlichem Druck verwenden.
Steuerbare Peripherie	Peripheriegeräte wie Nebelabsaugung oder Späneförderer müssen gesteuert werden können, z. B. über die Programmierung des Fertigungsprozesses.	Nach dem Stand der Technik sind Peripheriegeräte oft nur vom Betriebszustand abhängig und können deshalb nicht bedarfsgerecht betrieben werden.

6. Weitere Informationen

Weitere Informationen zum Thema Energieeffizienz und Betrieb ohne Nutzen sind auf folgenden Webseiten zu finden:

- EnergieSchweiz, www.energieschweiz.ch (Unternehmen)
- Bundesamt für Energie BFE, www.bfe.admin.ch
(Themen/Energieeffizienz/Prozessoptimierung Industrie und Dienstleistungen)
- Swissmem, www.swissmem.ch (Themen/Energie & Umwelt)
- Energie-Agentur der Wirtschaft EnAW, www.enaw.ch

7. Beteiligte Organisationen und Unternehmen

Projektteam:

Dr. Sonja Studer, Swissmem (Gesamtprojektverantwortung)

Dr. Rainer Züst, Züst Engineering AG (Projektleiter)

Lukas Weiss, inspire AG, ETH Zürich

Prof. Dr. Beat Wellig, Hochschule Luzern

Unternehmen:

ABB Turbo Systems AG (Christian Zott), Bühler AG (Fritz Langenegger, Roland Zwingli), Bystronic (Adolf Lauper), ESCO SA (Pierre-Louis Piguët), Grundfos Pumpen AG (Peter Egger), Helbling Technik AG (Guido Brunecker), Rollomatic SA (Dr. Pierre Pahud), Sulzer Pumpen (Sabine Sulzer), TRUMPF Maschinen AG (Dr. Thomas Bewer)

Dieses Projekt wurde vom Bundesamt für Energie BFE finanziell unterstützt.