

Reihe 2

Fertigungstechnik

Nr. 695

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl,  
Stuttgart

## Abschlussbericht FOR 1088 ECOMATION





Abschlussbericht

**FOR 1088**

**ECOMATION**

**Steuerung des Energiebedarfs in der Fertigung  
und Steigerung der Energieeffizienz durch Automatisierung**



Sprecher: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen  
und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart

2016



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 2

Fertigungstechnik

Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Dr. h.c. mult. Alexander Verl,  
Stuttgart

Nr. 695

Abschlussbericht  
FOR 1088 ECOMATION

VDI verlag

Verl, Alexander

## **Abschlussbericht FOR 1088 ECOMATION**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 695. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

180 Seiten, 86 Bilder, 5 Tabellen.

ISBN 978-3-18-369502-7, ISSN 0178-9406,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

**Für die Dokumentation:** Energieeffizienz – Energiebedarfsanalyse – Energiebedarfsoptimierung – Maschinensimulation – Speicherprogrammierbare Steuerung – Prozessanalyse – Demonstratormaschine – Energieeinsparung – Werkzeugmaschinen – Fertigungsprozess

Die Forschergruppe ECOMATION hatte sich zum Ziel gesetzt, den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen durch steuerungstechnische Maßnahmen zu reduzieren und somit die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen weiter zu steigern. Um die Zielgröße in die Steuerung zu integrieren, wurden in den Teilprojekten unterschiedliche Optimierer für den Prozess Fräsen, alle ansteuerbaren Komponenten sowie für die Gesamtmaschine entwickelt. Diese wurden durch Teilprojekt 2 in die Steuerungstechnik von Werkzeugmaschinen integriert. Insgesamt konnte in der Forschergruppe eine deutliche Einsparung des Energieverbrauchs in einem Referenzszenario erreicht werden. Weiterhin hat sich gezeigt, dass durch Optimierung von Wechselbeziehungen zwischen Optimierern weitere deutliche Einsparpotentiale zu erzielen sind.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9406

ISBN 978-3-18-369502-7

---

## Vorwort

Wir befinden uns erneut an einem Meilenstein der Geschichte der Menschheit. Nach den tiefgreifenden wirtschaftlichen und sozialen Veränderungen in der ganzen Welt stehen wir vor der Herausforderung bis Mitte des Jahrhunderts zehn Milliarden Menschen mit Nahrung zu versorgen. Verheerende Unwetter, Dürren und Überschwemmungen, bedingt durch die globale Erwärmung der Erde, lassen diese Herausforderung nicht einfacher erscheinen.

Seit der Industrialisierung ist das wirtschaftliche Wachstum eng mit dem Bedarf an Energie verknüpft. Die benötigte Energie wird dabei aber nicht nachhaltig erzeugt, sondern stammt immer noch zu großen Teilen aus fossilen Brennstoffen. Der daraus resultierende CO<sub>2</sub> Ausstoß stellt die Hauptursache für die globale Erwärmung dar.

Wollen wir der globalen Erwärmung entgegen wirken, ist eine intensive Auseinandersetzung mit den Energieverbrauchern in unserer Wirtschaft notwendig. Folgende Abhandlung befasst sich deshalb mit der Steuerung des Energiebedarfs in der Fertigung und Steigerung der Energieeffizienz durch Automatisierung und fasst damit die Ergebnisse der Forschergruppe ECOMATION (FOR 1088) aus den Jahren 2009 bis 2015 zusammen.

Alexander Verl





Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen/Symbole</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Energiebedarfsanalyse und Nutzungsprofile</b>	<b>3</b>
2.1 Verbrauchsanalyse des Dreh- und Fräsprozesses	3
2.1.1 Drehprozess – Demonstratorteil 1	4
2.1.2 Drehprozess – Versuche	5
2.1.3 Drehprozess –Auswertung	8
2.1.4 Fräsprozess – Demonstratorteil 1	12
2.1.5 Fräsprozess – Versuche	13
2.1.6 Fräsprozess –Auswertung	15
2.2 Verbrauchsanalyse der Maschinenkomponenten	19
2.2.1 Spindelantriebe	22
2.2.2 Maschinenkühlung	23
2.2.3 Kühl- Schmierstoffsystem	25
2.2.4 Hydrauliksystem	27
2.3 Gesamtverbrauch von Maschinen und Anlagen	29
2.4 Gesamtverbrauch der Produktion	31
<b>3 Energiebedarfsmodellierung</b>	<b>37</b>
3.1 Modelle des Dreh- und Fräsprozesses	37

3.1.1	Prozessmodell Drehen .....	40
3.1.2	Prozessmodell Fräsen .....	47
3.2	Verbrauchsmodellierung der Komponenten .....	58
3.2.1	Dynamische Modelle .....	59
3.2.2	Synchron-Hauptspindelantriebe .....	61
3.2.3	Asynchron-Hauptspindelantriebe .....	62
3.2.4	KSS-Hochdruck und KSS-Niederdruck Systeme.....	63
3.2.5	Hydrauliksysteme .....	65
3.2.6	Rückkühlsysteme .....	67
3.2.7	Statische Modelle.....	68
3.3	Betriebszustandsbasierte Verbrauchsmodellierung .....	70
3.4	Verbrauchsmodellierung der Produktion mit Peripherie .....	74
3.5	Monetäre Bewertung auf Basis von Verbrauchsmodellen.....	79
<b>4</b>	<b>Bereitstellung von Energiebedarfsinformationen und Energiebedarfsmonitoring</b>	<b>83</b>
4.1	Verfügbarkeit von Energiebedarfsinformationen .....	83
4.2	Energieinformationsbeschreibung (EIDL).....	86
4.3	ECIS – EIDL Erzeugung.....	88
4.4	ECIS – Energiebedarfsmonitor .....	91
4.4.1	Konstantmodelle .....	95
4.4.2	Dynamische Modelle .....	96
<b>5</b>	<b>Maßnahmen zur Energiebedarfsreduktion</b>	<b>97</b>
5.1	Ansatzpunkte zur Minimierung des Energieverbrauchs .....	97
5.2	Prozessoptimierer.....	99
5.2.1	Prozessoptimierer 1 .....	101
5.3	Komponentenoptimierer .....	104
5.3.1	Beleuchtung .....	105
5.3.2	Absaugung .....	106
5.3.3	Maschinenkühlung.....	107

5.3.4	Hydrauliksystem .....	108
5.4	Betriebszustandsbasierte Energiebedarfsoptimierung .....	110
5.5	Energiebedarfsoptimale PPS.....	113
5.5.1	Energiebedarf als weitere Zielgröße .....	114
5.5.2	Fingerprints inkl. Anpassung.....	117
5.5.3	Messageing System und VDI 5600 Blatt 3.....	118
<b>6</b>	<b>Framework zur Energiebedarfsoptimalen Ansteuerung</b> .....	<b>121</b>
6.1	Aufgaben des Framework zur energieoptimalen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen .....	121
6.2	Frameworkbasierte Bereitstellung des energetischen Istzustandes.....	123
6.3	Frameworkbasierte Durchführung von Stelleingriffen .....	124
6.4	Integration der Energieoptimierer in das Framework .....	126
6.4.1	Schnittstellen der Energieoptimierer .....	128
6.4.2	Anbindung an die Werkzeugmaschine und Konfiguration der Energieoptimierer .....	132
6.4.3	Ausführung der Energieoptimierer .....	133
6.5	Beeinflussung und Überwachung von Energieoptimierern zur Laufzeit .....	135
6.5.1	Vorgabe von Führungsgrößen und Überwachung durch den Maschinenbediener .....	135
6.5.2	Vorgabe von Führungsgrößen und Überwachung durch das MES .....	136
6.6	Zusammenfassung.....	140
<b>7</b>	<b>ECOMATION Demonstrator</b> .....	<b>143</b>
7.1	Überblick Optimierungsebene und Anwendungsfälle .....	143
7.2	ECOMATION Prozessanalyse und -bewertungstool .....	146
7.3	ECOMATION Maschinensimulationen .....	150
7.4	ECOMATION Demonstratormaschine.....	153

7.5	ECOMATION Planung- und Steuerung .....	154
7.6	Versuchsszenario zur Energieeinsparung .....	156
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>159</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>161</b>

## Abkürzungen/Symbole

csv	Dateiformat Komma-getrennte Werte (engl. Comma-separated Values)
E/A	Eingangs/Ausgangs
EIDL	Energy Information Description Language
OPC	OLE for Process Control
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
A	Adjazenzmatrix



## 1 Einleitung

*A. Verl, Ph. Eberspächer, J. Schlechtendahl*

Die Forschergruppe ECOMATION hat sich zum Ziel gesetzt, den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen durch steuerungstechnische Maßnahmen zu reduzieren und somit die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen weiter zu steigern. Dabei ist die Idealvorstellung, die Leistungsaufnahme auf den reinen, für den Fertigungsprozess benötigten Leistungsbedarf zu reduzieren (siehe Bild 1-1), ohne dabei die gängigen Zielgrößen wie Qualität, Produktivität, Sicherheit etc. außer Acht zu lassen.

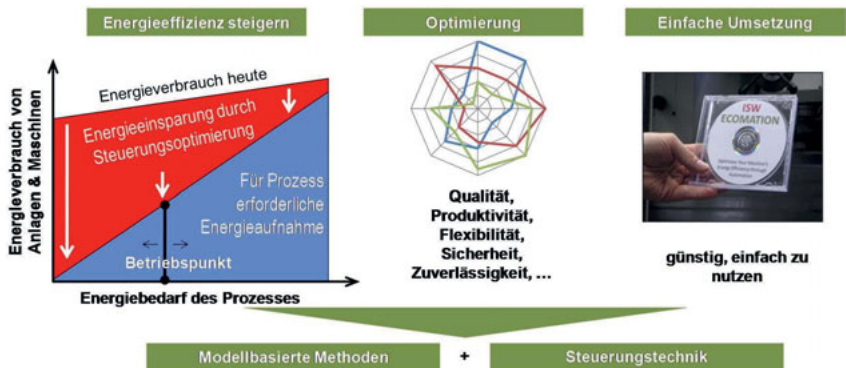


Bild 1-1: Ziele der Forschergruppe ECOMATION

Der Energieverbrauch kann durch den Einsatz von modellbasierten Methoden für beliebige Szenarien vorhergesagt werden. Somit kann das energieoptimale Szenario in der Fertigung zum Einsatz kommen. Durch die Integration der Zielgröße Energieverbrauch in die Steuerungen selbst, können Maschinen energieoptimal betrieben werden.

Um die Zielgröße in die Steuerung zu integrieren, existieren im Rahmen der Forschergruppe 5 Teilprojekte, die mit unterschiedlichen Sichtweisen und Arbeitsergebnissen zur Zielerreichung der Forschergruppe beitragen (vgl. Bild 1-2):

- Das erste Teilprojekt befasst sich mit der Modellierung des Energieverbrauchs auf Maschinenebene
- Das zweite Teilprojekt mit der mit der Integration von Maßnahmen in industrielle Steuerungstechnik
- Das dritte Teilprojekt kümmert sich um die Optimierung der Fabrik
- Im vierten Teilprojekt werden steuerbare Komponenten modelliert und optimiert
- Im fünften und letzten Teilprojekt steht die Optimierung des Prozesses im Mittelpunkt

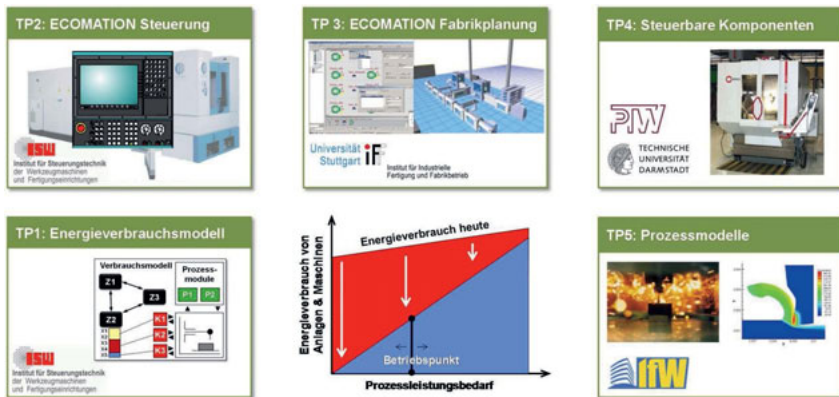


Bild 1-2: Aufbau der Forschergruppe ECOMATION

Die Forschergruppe umfasst alle relevanten Themenschwerpunkte um an den Referenzprozessen Drehen und Fräsen eine Integration des Energieverbrauchs in die Steuerungstechnik zu erreichen. Die im Rahmen der Forschergruppe erarbeiteten Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.



---

## 2 Energiebedarfsanalyse und Nutzungsprofile

### 2.1 Verbrauchsanalyse des Dreh- und Fräsprozesses

*S. Braun*

Prozessbezogene Energieverbrauchsaspekte des Gesamtsystems Werkzeugmaschine wurden bisher nur ansatzweise untersucht. Im Hinblick auf einen energieeffizienten Einsatz von Werkzeugmaschinen sind Untersuchungen zur optimalen Prozessführung und zur Schnittparameterwahl von Bedeutung, da durch optimierte Abläufe Bearbeitungszeiten und somit auch unproduktive Nebenzeiten und der Gesamtenergieaufwand gesenkt werden.

Durch Energieverbrauchsmessungen während der Zerspanung unter variierenden Prozessbedingungen und Untersuchung der physikalischen Wirkpfade kann der Einfluss unterschiedlicher Prozessabläufe und Prozessparameter auf den Energieverbrauch der Werkzeugmaschine ermittelt werden. Die Forschergruppe beschränkte sich hierbei auf spanende Verfahren und hier insbesondere auf die beiden Verfahren Drehen und Fräsen. Durch die getrennte Betrachtung dieser Verfahren kann bei der späteren Modellbildung explizit auf die Besonderheiten des jeweiligen Verfahrens in Bezug auf Spanbildung und Werkzeugbahnführung eingegangen werden. Parallel zu Energieverbrauchsmessungen werden Zerspankraftmessungen durchgeführt, um die für die Parametrierung der Prozessmodelle notwendigen Schnittkraftkoeffizienten aus den Messdaten identifizieren zu können. Die

Messungen liefern die Basis zum Abgleich aller Modelle und zur Erarbeitung einer Systematik von Eingriffsparametern für die Minimierung des Energieverbrauchs. Der Maschinennutzer erhält Bewertungskriterien zur Beurteilung der Energieeffizienz von Prozessen, Maschinen und Komponenten an die Hand. Die experimentelle Untersuchung der Energieaufnahme liefert der Forschergruppe Verbrauchscharakteristiken und Daten für Teilprojekt 1 und Randbedingungen für die Maschinenkomponentenmodellierung in Teilprojekt 4. Die gewonnenen Erkenntnisse werden aggregiert und in möglichst allgemeingültige Modelle umgesetzt. Strategien zur Verbrauchsminimierung von Werkzeugmaschinen über Verfahrensumstellungen können daraus abgeleitet werden.

### **2.1.1 Drehprozess – Demonstratorteil 1**

Für das Verfahren Drehen wurde ein Modellbearbeitungsfall mit zugehöriger Referenz-Werkstückgeometrie (siehe Bild 2-1) definiert, der die wesentlichsten Merkmale einer industrietüblichen Drehbearbeitung abdeckt. Die Hauptcharakteristika und Bearbeitungsabfolgen des Referenzteils sind im Einzelnen: Beidseitige Einspannung mit 3-Backenfutter und Reitstockspitze, Plandrehen der Stirnseite mit konstanter Schnittgeschwindigkeit, Längsdrehen im Schruppzyklus, Werkzeugwechsel, Schlichtzyklus, Werkzeugwechsel, Einstechen einer Sicherungsringnut, Werkzeugwechsel, Freistich nach DIN 509 - Form F, Werkzeugwechsel, Fräsen einer Passfedernut, Werkzeugwechsel, Gewindedrehen und schließlich Ausspannen.

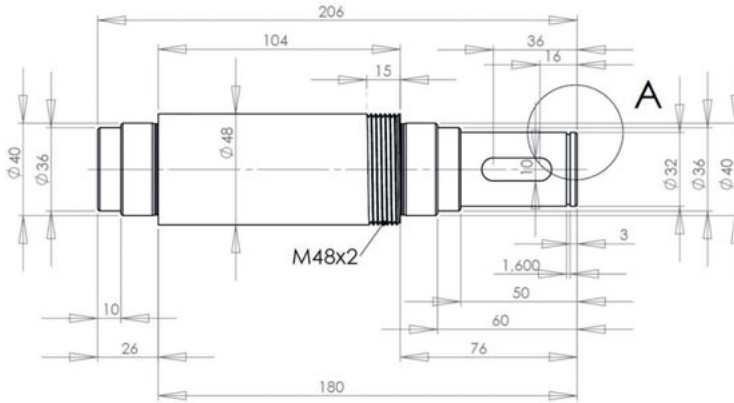


Bild 2-1: Referenzwerkstück für den Drehprozess, Werkstoff 42CrMoV4

### 2.1.2 Drehprozess – Versuche

Die Bearbeitungsversuche für das Drehen wurden auf einer Gildemeister CTX 420 linear, Bild 2-2, durchgeführt. Die Drehmaschine ist mit einer 28,3 kW Synchronmotorspindel und einem Revolver mit 12 Werkzeugplätzen und angetriebenen Werkzeugen ausgerüstet. Sie besitzt Kugelrollspindelantriebe mit Synchronmotoren in den Z- und Y-Achsen und eine lineardirekt-angetriebene X-Achse. Ein Hydraulikkreis mit Speicherladesystem versorgt Spannfutter, Revolververriegelung, Reitstockspitze, Pinole und Lünette. Die KSS-Versorgung erfolgt über eine unregelte KSS-Pumpe mit Asynchronmotor. Hauptspindel, Lineardirektmotor und Hydrauliksystem verfügen über je ein Kühlaggregat. Ferner ist die Maschine mit Späneförderer und Arbeitsraumabsaugung ausgerüstet.



Bild 2-2: Versuchsmaschine Gildemeister CTX 420 linear  
(Quelle: Gildemeister)

Die Zerspanversuche wurden an Rundmaterial 42CrMo4V mit 72 mm Ausgangsdurchmesser und einer Gesamt-Werkstücklänge von 210 mm durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit wurde in 3 Stufen von 80, 110 und 140 m/min variiert bei Schnitttiefen von 1, 2, 2.5, 3, 3.5 mm und Vorschüben von 0.1, 0.25, 0.4 und 0.55 mm/Umdr.. Die gesamten Versuchsreihen wurden bei 3 verschiedenen Kühlschmierstoffmengen von 0.25, 4.8 und 11.6 l/min wiederholt. Die gesamte Parametrix hatte demnach eine Dimension von  $3 \times 5 \times 4 \times 3$ , entspr. 180 Parameterkombinationen. Ziel dieser Versuchsreihe war es, Basiswerte für den Modellabgleich zu erhalten, Schnittkraftkoeffizienten für das Zerspankraftmodell zu identifizieren, die Leistungsaufnahme zu ermitteln und die Grundcharakteristika nichtenergetischer Kenngrößen bei Parametervariationen kennenzulernen.

Mittels eines triaxialen Kraftmess-Werkzeughalters der Fa. Kistler wurden die Zerspankräfte gemessen. Die Leistungsaufnahme der Maschine wurde am Hauptanschluss bestimmt.

Die Leistungsmessungen wurden darüber hinaus bei verschiedenen Maschinenzuständen durchgeführt, um zustandsabhängige Grundlasten ermitteln zu können. So wurde im ausgeschalteten Zustand gemessen, mit Hauptschalter an und Steuerung an, dann mit eingeschalteten Antrieben. Exemplarisch ist in Bild 2-3 die Leistungsaufnahme während der Einschaltsequenz der Versuchsmaschine abgebildet.

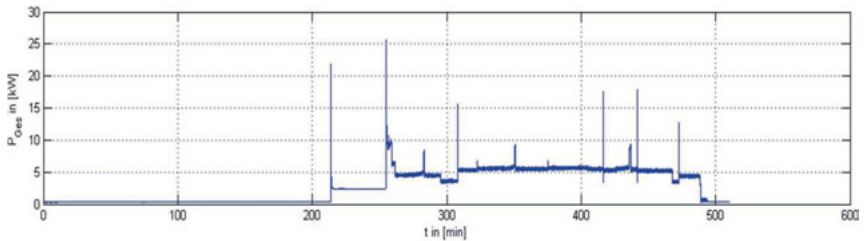


Bild 2-3: Leistungsaufnahme während der Einschaltsequenz der Drehmaschine mit Durchlaufen unterschiedlicher Energiezustände.

Weitere Messungen deckten den Spindelhochlauf auf verschiedene Drehzahlen ab und die Bewegungen der Vorschubachsen mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Die zusätzlichen Leistungsaufnahmen von KSS-Pumpe und Späneförderer wurden gemessen und der Leistungsbedarf für die Revolverweitschaltung beim Werkzeugwechsel.

Exemplarisch ist in Bild 2-4 links die Leistungsaufnahme während einer Versuchssequenz mit  $v_c = 110 \text{ m/min}$  und  $a_p = 2.5 \text{ mm}$  und vier unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten  $f_z = 0.1, 0.25, 0.4$  und  $0.55 \text{ mm/Umdr.}$  (entspr. Segmente a, b, c, d) wiedergegeben. Das rechte Diagramm zeigt die aufgenommene Leistung während Hochläufen der Hauptspindel von  $n = 100 \text{ min}^{-1}$  bis  $5.000 \text{ min}^{-1}$ . Bei diesem Vorgang spielen die Transienten während der Beschleunigungs- und Abbremsphasen eine wichtigere Rolle.

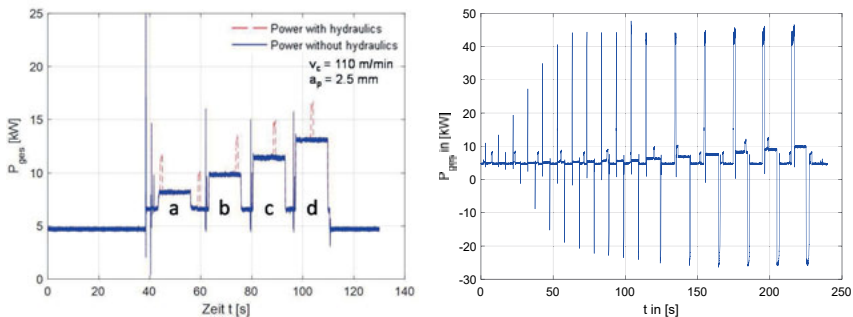


Bild 2-4: Links: Gemessene Leistungsaufnahme während einer Zer-spansequenz; Rechts: Beschleunigen und Abbremsen der Hauptspindel auf unterschiedliche Drehzahlen.

### 2.1.3 Drehprozess –Auswertung

Aus den Drehversuchen wurde überraschenderweise ersichtlich, dass eine Variation der KSS-Menge nahezu keinen Einfluss auf die Schnittkräfte und die aufgenommene Leistung hat. Lediglich bei der geringsten Durchflussmenge von 0.25 l/min ergaben sich geringfügig höhere Leistungswerte, die thermischen Bedingungen am Span waren dabei grenzwertig, die Späne zeigten v. a. bei hohem Vorschub und hoher Schnittgeschwindigkeit Blaufärbungen.. Hoher Verschleiß trat auf und die Oberflächenqualität war schlechter als bei höherer KSS-Menge. Für die Modellierung des Energieverbrauchs bedeutet dies, dass die geringfügigen Effekte auf die Leistungsaufnahme v.a. der Hauptspindel nicht zwingend modelliert werden müssen. Falls unterschiedliche KSS-Fördermengen jedoch zu deutlichen Unterschieden in der Leistungsaufnahme der KSS-Pumpe aufgrund deren Kennliniencharakteristik führen, muss dies über die Komponentenmodellierung der KSS-Versorgungseinheit abgebildet werden. Insbesondere bei Prozessen mit ho-

hen Leistungsaufnahmen der KSS-Systeme führt dies zu stärker prozessabhängigen Anteilen im Gesamt-Energieverbrauch. Hierunter fallen bspw. Hochdruck-Werkzeug-Innenkühlung und KSS-Hochdrucksysteme beim Tieflöchbohren und/oder Systeme mit hohem Durchfluss *und* Druck wie sie beim Schleifen Verwendung finden. Hier wird Bedarf gesehen, in den weiteren Forschungsarbeiten den Aspekt der thermischen Bedingungen sowie auch des Späneabtransports und die daraus resultierenden Anforderungen an die KSS-Versorgung eingehend zu untersuchen. Bei der Drehmaschine Gildemeister CTX 420 linear konnte nur eine marginale Abhängigkeit der Leistungsaufnahme der KSS-Pumpe von der Fördermenge festgestellt werden, so dass dieser Faktor keine Rolle spielt. Bei Systemen, bei denen die Leistungsaufnahme stärker von KSS-Volumenstrom und Druck abhängt, sollte dieser Faktor berücksichtigt werden.

Mit höherer Schnittgeschwindigkeit ist eine äußerst geringfügige Zunahme der Schnittkraft zu verzeichnen, welche im Basisansatz nach Kienzle-Viktor jedoch nicht abgebildet wird. Durch einen geschwindigkeitsabhängigen Korrekturterm kann dieser Effekt im Modell nachgebildet werden. Die Leistungsaufnahme wird bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten weniger durch diese geringe Schnittkraftzunahme verursacht, vielmehr ist der Haupteinflussfaktor die zur Erzielung der höheren Schnittgeschwindigkeiten erforderliche Drehzahlsteigerung des Hauptantriebs und die damit einhergehende erhöhte Strom- und Leistungsaufnahme (vgl. Bild 2-5 rechts).

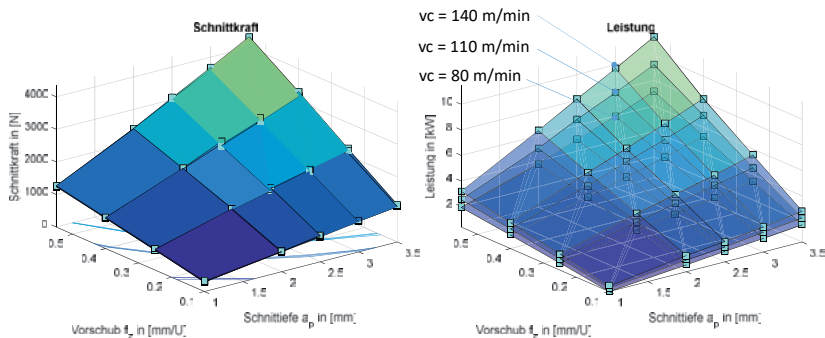


Bild 2-5: Links: Schnittkraft  $F_c$ ; rechts: aufgenommene Spindelleistung  $P$  jeweils in Abhängigkeit von  $v_c$ ,  $a_p$  und  $f_z$

Trägt man in dem Skalarfeld der Leistungsaufnahme, welches über die drei Größen  $a_p$ ,  $f_z$  und  $v_c$  aufgespannt wird, Isoflächen mit konstantem Zeitspanvolumen (Material Removal Rate MRR) ein, so findet man für eine konstante MRR ein Leistungsminimum bei kleinen  $f_z$  und großen  $a_p$ , d.h. bei kleinen Vorschüben und großen Zustelltiefen. Exemplarisch ist dies in Bild 2-6 für eine konstante MRR von  $80 \text{ cm}^3/\text{min}$  dargestellt. Zusätzlich ist hier die Fläche konstanter Schnittgeschwindigkeit bei  $v_c = 110 \text{ m/min}$  eingezeichnet. Nicht alle Parameterkombinationen, die zu der gleichen konstanten MRR führen, weisen aber zufriedenstellende Zerspanergebnisse und gute Spanformen auf. Gute Spanformen ergeben sich eher im mittleren bis linken Bereich der Isofläche konstanter MRR, d.h. bei mittleren bis größeren Vorschüben und dafür geringerer Schnitttiefe. Im Sinne eines energetisch günstigen Prozesses sollten jedoch der Vorschub so gering wie möglich und dafür die Schnitttiefe so groß als möglich gewählt werden, so dass sich gerade noch akzeptable Spanformen ergeben.



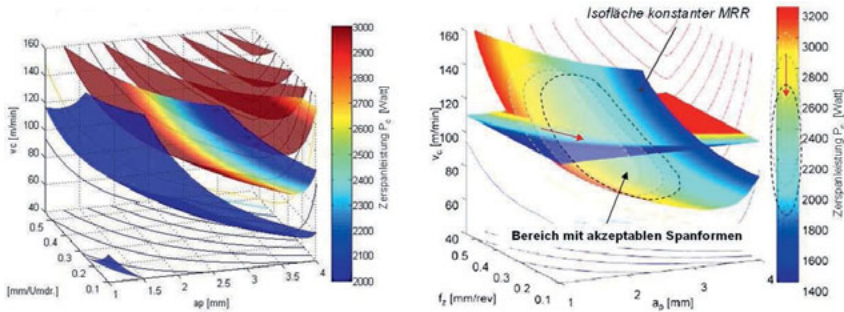


Bild 2-6: Links: Isoflächen konstanten Zeitspanvolumens, rechts: Zeitspanvolumen 80 cm<sup>3</sup>/min mit energetisch günstigen Bereichen

Eine Reduktion der prozessbedingten Leistungsanforderung an die Hauptspindel bei den vorliegenden Versuchen ist um etwa 400 bis 500 W gegenüber praxisüblichen Schnittparametern möglich. Dies entspricht im Parameterbereich des Versuchs (bei eher kleinen MRR) einer Minderung von ca. 2,8 kW auf 2,4 kW (14%). Erste Aussagen zu möglichen Stellgrößen für einen prozessseitigen Eingriff über die Schnittparameter Vorschub und Schnitttiefe – d. h. Schnittaufteilung bei gegebenem abzutragenden Spanvolumen, sind somit möglich.

Die Untersuchungen wurden durch Messungen während des Referenz-Bearbeitungsfalls „Drehen eines Wellenteils aus 42CrMoV4“ vervollständigt. Hierbei wurde die gesamte Bearbeitungsabfolge zweimal gemessen, wobei sich das Werkzeug bei einer Messung im Eingriff befand, bei der anderen aber eine „Luftbearbeitung“ stattfand. Aus dem Vergleich beider Messschriebe lassen sich so Rückschlüsse ziehen, in welchen Bearbeitungsabschnitten eine hohe Leistungsanforderung aufgrund tatsächlich hoher Zerspanleistung erfolgt (wie bspw. in Bild 2-7 zwischen etwa 80 s und 180 s)

und welchen Anteil die eigentliche Spanbildung am Gesamt-Energieverbrauch hat. Oftmals sind Grundlast und Verfahrbewegungen – insbesondere während Finishingoperationen mit geringer Spanlast – dominierend für den Verbrauch.

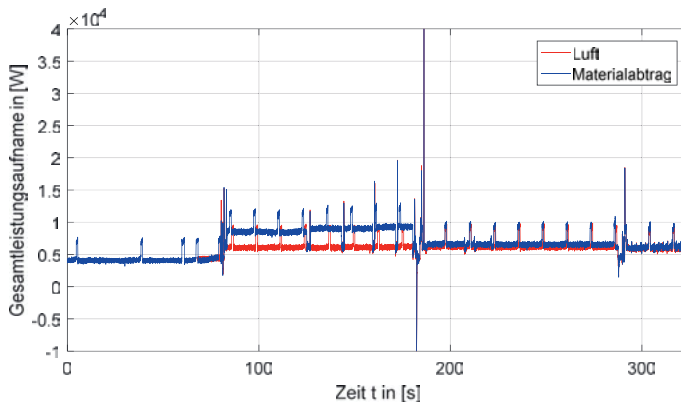


Bild 2-7: Gemessene Gesamtleistungsaufnahme bei der Referenzbearbeitung des Wellenteils (bis  $t = 320$  s)

### 2.1.4 Fräsprozess – Demonstratorteil 1

Das Demonstrator- bzw. Referenzteil – wie in Bild 2-8 dargestellt – für die 3-achsige Fräsbearbeitung stellt gängige Features für eine HSC-Leichtmetallzerspanung im industriellen Umfeld bereit. Das kubische Referenzteil aus dem Werkstoff AlMgSi1 weist neben der Profilarbeit einer Außen- und Innenkontur sowie der Profilierung dreier Ecken in Form einer Fase und einer konkaven und konvexen Krümmung vier Taschengemetrien auf (zwei Kreistaschen  $\varnothing 76$  mm und zwei Rechtecktaschen mit  $a \times b = 76 \times 76$  mm), welche mit unterschiedlichen Strategien bearbeitet werden. Die Taschenbearbeitung erfolgt einmal konturnah zirkular von innen nach außen, ein andermal zeilenweise entlang der X-Achse mit abwechselndem Gleich-

und Gegenlauf. Das Eintauchen in die Taschen erfolgt bei den Kreistaschen zirkular in Form einer Spirale, bei den Rechtecktaschen linear in Form einer Eintauchrampe. Die Taschenfeatures mit unterschiedlichen Bearbeitungsstrategien erlauben es, Betrachtungen des Energieverbrauchs in Abhängigkeit der Bearbeitungsstrategie. Die Bearbeitungen erfolgten zudem mit sukzessive zunehmender Zustellung (Schnitttiefen von  $a_p = 1.0, 1.5, 2.0$  und  $2.5$  mm). Als Werkzeuge kamen ein dreischneidiger, beschichteter VHM-(Vollhartmetall)-Schrupfräser und ein vierschneidiger VHM-Schlichtfräser zum Einsatz.

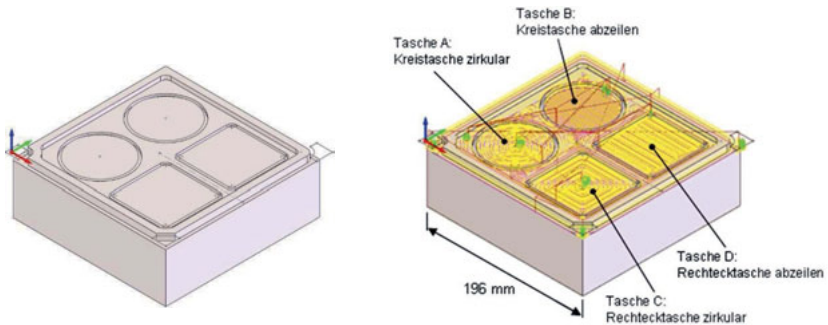


Bild 2-8: Kubisches Referenzteil für die 3-achsige Fräsbearbeitung aus AlMgSi1 (links) und Werkzeugbahnen der Referenzbearbeitung

### 2.1.5 Fräsprozess – Versuche

Die Messungen des Energieverbrauchs bei der HSC-Leichtmetallzerspanung erfolgten auf der Demonstratormaschine, einer DIGMA Exeron HSC 600 (vgl. Bild 2-9 links). Die Maschine besitzt neben den drei Achsen X, Y und Z zusätzlich die Schwenkachsen A und B, welche für die 3-achsige Bearbeitung jedoch nicht zum Einsatz kamen. Die Versuchsmaschine ver-

fügt über eine Minimalmengenschmierung, ein Kühlaggregat mit zwei Leistungsstufen, eine Hydraulikanlage mit Speicherladebetrieb und eine Absaugeinrichtung. Die Bearbeitungsversuche wurden unter Variation von Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Zustellung (Schnitttiefe  $a_p$ ) anhand des Referenzteils durchgeführt. Die Technologieparameterbereiche sind der Tabelle 2-1 zu entnehmen. Während der Versuche wurden die Gesamtleistungsaufnahme der Maschine und die Leistungsaufnahme der Antriebe gemessen. Darüber hinaus wurde eine Versuchsreihe auf einem Bearbeitungszentrum HERMLE UWF1202H (vgl. Bild 2-9 rechts) zur Parameteridentifikation des Zerspankraftmodells und zum späteren Abgleich von Modell und Messung durchgeführt. Dabei wurden die Zerspankräfte und die Spindelmomente mit KISTLER Dynamometern aufgenommen. Die Versuche erfolgten an Werkstücken aus Stahl ST 52-3 und dem Aluminiumwerkstoff AlMgSi1. Die Technologieparameter sind der Tabelle 2-2 zu entnehmen.

Tabelle 2-1: Technologieparameter der Bearbeitungsversuche am Referenzteil Fräsen auf DIGMA Exeron HSC 600

	n [%]	40%	60%	80%	100%	125%
	n [1/min]	5968.4	8952.6	11936.8	14921	18651
F [%]	fz:	F [mm/min]				
125%	0.0470	841.3	1262.0	1682.6	2103.3	2629.1
100%	0.0375	671.4	1007.2	1342.9	1678.6	2098.3
80%	0.0300	537.2	805.7	1074.3	1342.9	1678.6
60%	0.0225	402.9	604.3	805.7	1007.2	1259.0
40%	0.0150	268.6	402.9	537.2	671.4	839.3

Tabelle 2-2: Technologieparameter der Zerspanversuche auf HERMLE UWF1202H

	n [1/min]	3000	3500	4000
	vc [m/min]	75.4	88.0	100.5
F [%]	fz	F [mm/min]		
125%	0.047	422.89	493.37	563.85
100%	0.038	337.50	393.75	450.00
80%	0.030	270.00	315.00	360.00
60%	0.023	202.50	236.25	270.00
40%	0.015	135.00	157.50	180.00



Bild 2-9: Versuchsmaschinen DIGMA Exeron HSC 600 und HERMLE UWF1202H (Quelle: Exeron und IfW/Hermle)

### 2.1.6 Fräsprozess –Auswertung

Die während der HSC-Zerspanung mit 100% programmierter Spindeldrehzahl und 100% programmiertem Vorschub aufgenommene Leistung der DIGMA Exeron HSC 600 übersteigt die reine prozessbedingte Schnittleistung um nahezu den Faktor 15. (3.8 kW gegenüber 250 W Hauptspindelleistung). Der Unterschied in der Leistungsaufnahme zwischen einem Luftschnitt knapp über der Schnittebene und tatsächlichem Schnitt im Material

beträgt  $3.8 \text{ kW} - 2.26 \text{ kW} = 1.54 \text{ kW}$ . Die in Anspruch genommene Kühlleistung beträgt im Durchschnitt beides Male etwa  $1030 \text{ W}$ . Diese Verhältnisse ändern sich mit variierenden Technologieparametern kaum. Es fällt also ein beträchtliches Ungleichgewicht der reinen Maschinengrundlast gegenüber der durch den Prozess zusätzlich verursachten Last auf.

Der Gesamtenergieverbrauch steigt mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit respektive höherer Hauptspindeldrehzahl stark an. Bei abnehmendem Zahnvorschub kommt es infolge der verlängerten Bearbeitungszeit ebenso zu einer Zunahme der verbrauchten elektrischen Arbeit (vgl. Bild 2-10) Die Abhängigkeit des Energieverbrauchs vom Zeitspanvolumen lässt sich über ein Potenzgesetz in der Form  $W_{el} = a \cdot MRR^n$  annähern.

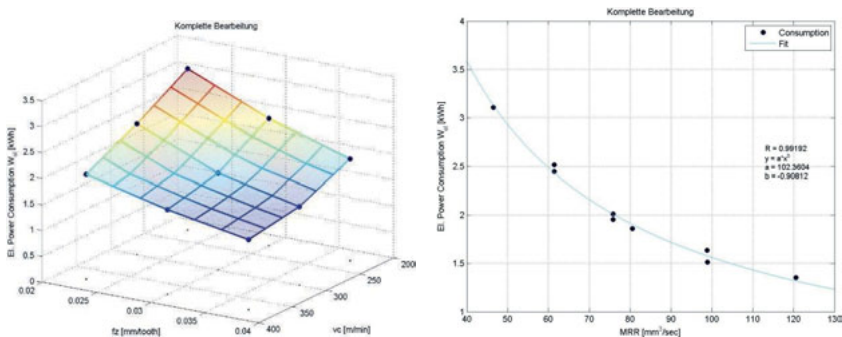


Bild 2-10: Gesamter Energieverbrauch der DIGMA Exeron HSC 600 während der Referenzbearbeitung (links) und Abhängigkeit des Energieverbrauchs vom Zeitspanvolumen MRR (rechts)

Trägt man die Leistungsaufnahme der *gesamten* Maschine über verschiedene Technologieparameterkombinationen auf, so fällt die äußerst geringe Änderung der Gesamtleistungsaufnahme ins Auge (siehe Bild 2-11). Die

Schnittgeschwindigkeit zeigt einen geringen Einfluss auf die Leistungsaufnahme, der Zahnvorschub kaum. Der rechte Teil der Abbildung zeigt die reine Leistungsaufnahme der Hauptspindel für verschiedene Schnitttiefen ( $a_p = 1.0, 1.5, 2.0$  und  $2.5$  mm) bei zirkularer, konturnaher Rechtecktaschenbearbeitung. Infolge zunehmenden Zeitspanvolumens bei zunehmender Schnitttiefe ist die Erhöhung der Hauptspindleistung nachvollziehbar, sie bewegt sich jedoch im Bereich weniger hundert Watt. Dieser geringe Leistungsanteil im Vergleich zur Gesamtmaschinenleistung von mehreren Kilowatt erklärt die geringe Abhängigkeit der Maschinenleistung von den Bearbeitungsparametern. Es fällt ein beträchtliches Ungleichgewicht der reinen Maschinen-Grundlast gegenüber der durch den Prozess zusätzlich verursachten Last auf. Bei vorliegenden HSC-Bearbeitung ist die Beeinflussungsmöglichkeit des Energieverbrauchs seitens der Technologieparameter nur in Form eine Vorschubänderung sinnvoll im Sinne einer Vorschuberhöhung und damit Verkürzung der Bearbeitungszeit. Dies reduziert die Zeit, in der der ständig anliegende Grundlastanteil den Stück-Energieverbrauch dominiert und reduziert damit den Gesamtverbrauch.

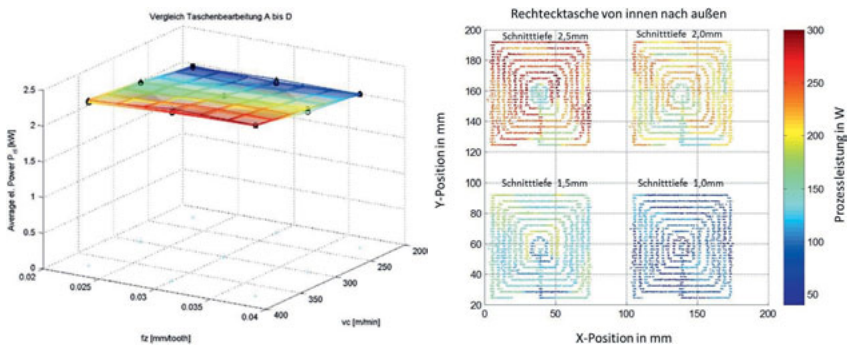


Bild 2-11: Leistungsaufnahme der Exeron HSC 600 während der Referenzbearbeitung (links) und Mapping der reinen Prozessleistung auf den Werkzeugweg bei der Taschenbearbeitung (rechts)

Bild 2-12 zeigt die höhere Sensitivität der Leistungsaufnahme bei einer Variation der Schnittgeschwindigkeit – respektive Spindeldrehzahl. Eine Vorschubvariation beeinflusst die Leistungsaufnahme hingegen weniger.

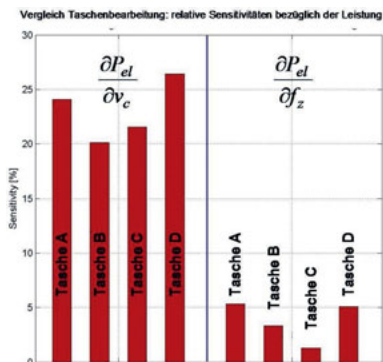


Bild 2-12: Sensitivität der Leistungsaufnahme gegenüber einer Änderung von Schnittgeschwindigkeit und Zahnvorschub bei Taschenbearbeitung A bis D



Exemplarische Messergebnisse der Zerspanversuche mit Schnittkraft- und Momentenerfassung über Kraftmessplattform und Dynamometer auf dem Bearbeitungszentrum HERMLE UWF 1202H zeigt Bild 2-13. Diese Art Messungen bilden die Datenbasis, um später die gemessenen Zerspankraftkomponenten bzw. Spindeldrehmomente mit akzeptablem Fehler durch ein geeignet parametrisiertes empirisches Zerspankraftgesetz nach Kienzle-Viktor zu approximieren.

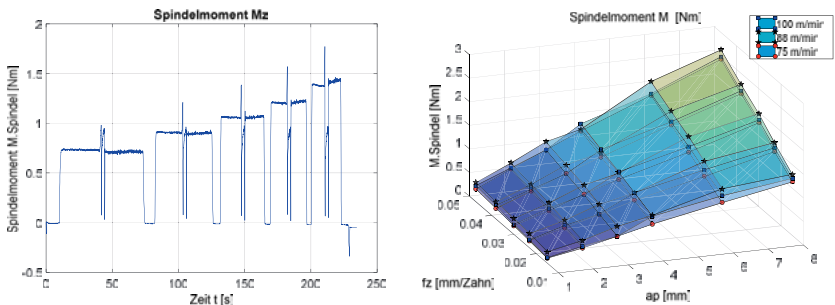


Bild 2-13: Gemessene Hauptspindeldrehmomente während einer Bearbeitungssequenz (links) und in Abhängigkeit von Schnitttiefe und Vorschub (rechts), HERMLE UWF 1202H

## 2.2 Verbrauchsanalyse der Maschinenkomponenten

*E. Abele, P. Schraml*

Bei der in der Forschergruppe betrachteten Demonstratormaschine zur Fräsbearbeitung handelt es sich um ein Hochgeschwindigkeitsbearbeitungszentrum der Firma Exeron. Die Maschine besitzt fünf mit Synchronmotoren bestückte Linearachsen und eine Asynchronmotorspindel mit einer maximalen Drehzahl von  $42.000 \text{ min}^{-1}$ . Eine Übersicht aller weiteren relevanten Haupt- & Nebenantriebe ist in Bild 2-14 dargestellt.

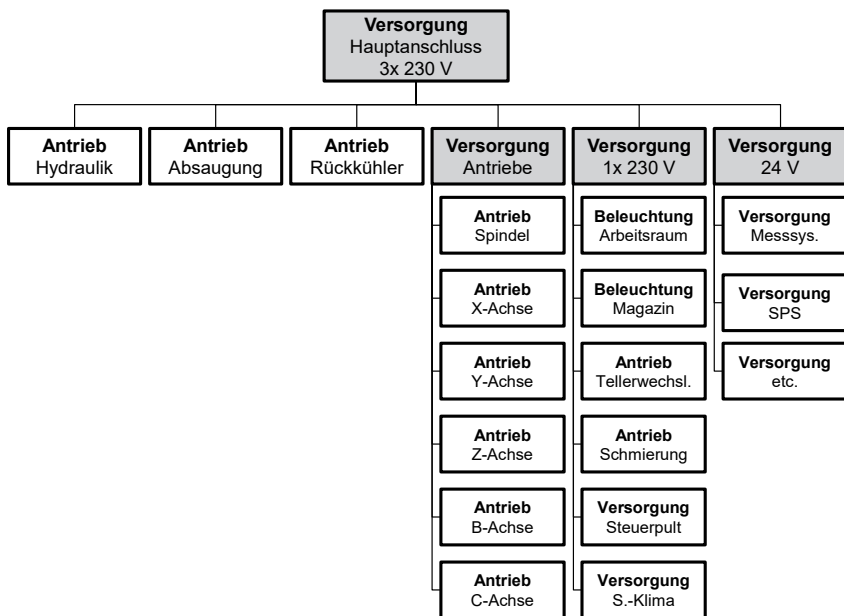


Bild 2-14: Schematische Darstellung der Haupt- & Nebenantriebe der Demonstratormaschine

Die durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme der größten Verbraucher ist in Bild 2-15 aufgezeigt. Ausgehend von der abgefragten Spitzenlast sind vor allem das Hydrauliksystem und die Maschinenkühlung die energieintensivsten Nebenaggregate. Die Leistungsaufnahme des Rückkühlers setzt sich dabei aus der Leistungsaufnahme der permanent laufenden Umwälzpumpe und der Leistungsaufnahme des im Hysteresebetrieb angesteuerten Kühlkompressors zusammen. Die Leistungsaufnahme der Spindel im Leerlauf bei unterschiedlichen Drehzahlen ist ebenfalls Bild 2-15 zu entnehmen. Diese entspricht der Summe aus Eisenverlusten im Rotor- und Statorblech sowie Lüftungs- und Lagerreibungsverlusten und Umrichterverlusten.

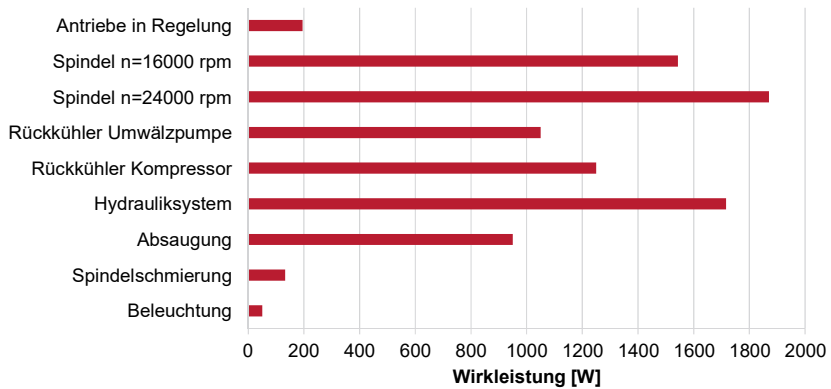


Bild 2-15: Durchschnittliche elektrische Leistungsaufnahme der einzelnen Maschinenkomponenten wenn aktiv

Ein etwas anderes Bild – vgl. Bild 2-16 – ergibt sich bei der Betrachtung der mittleren Leistungsaufnahme der einzelnen Aggregate im Betriebsmodus „Warten auf Teile“. So ist zwar das Hydrauliksystem eines der Aggregate mit der größten Spitzenlast, durch die sehr geringe Systemleckage und den dadurch ermöglichten Abschaltbetrieb ist die mittlere Leistungsaufnahme allerdings deutlich geringer als bspw. die der Beleuchtung.

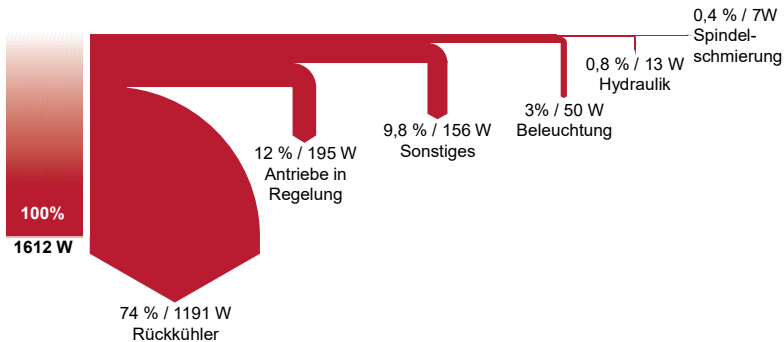


Bild 2-16: Durchschnittliche el. Leistungsaufnahme der Maschinenkomponenten im Modus „Betriebsbereit“

## 2.2.1 Spindelantriebe

Die Hauptspindel ist eine wesentliche Komponente von Werkzeugmaschinen für die spanende Fertigung. Sie stellt die für den Zerspanprozess notwendigen Drehmomente und Drehzahlen zur Verfügung. Seit Beginn der 1990er Jahre wurden verstärkt Motorspindeln für Bearbeitungszentren und Drehmaschinen entwickelt. Sie haben gegenüber den bis dato eingesetzten konventionellen Lösungen mit externem Antrieb über Kupplungen, Riemen oder Zahnräder die größere Laufruhe und die geringeren Laufabweichungen. Außerdem lassen sich durch die geringeren rotierenden Massen und dem Wegfall von mechanischen Übertragungselementen kürzere Hochlauf- und Bremszeiten sowie deutlich höhere Wirkungsgrade erzielen. Die erzielbaren Oberflächenqualitäten der Werkstücke sind höher und die Hauptzeiten geringer. Aufgrund dieser Vorteile hat sich die Motorspindel in spanenden Produktionsmaschinen als Hauptspindelantrieb durchgesetzt und gilt mittlerweile als Stand der Technik.

Als elektrische Antriebe kommen in Motorspindeln, je nach Anwendungsfall, sowohl Asynchronmaschinen in Käfigläuferbauweise als auch permanentmagneterregte Synchronmaschinen zum Einsatz. In den letzten Jahren hat sich im High-End Bereich der Synchronmotor aufgrund einer Vielzahl von Vorteilen durchgesetzt. So besitzt er im Vergleich zum Asynchronmotor eine höhere Leistungsdichte (Leistung pro Volumen) und ein höheres Leistungsgewicht (Leistung pro Masse). Weiterhin verfügt er über einen höheren Wirkungsgrad im gesamten Arbeitsbereich und durch die höhere erzielbare Dynamik lassen sich kürzere Span zu Span Zeiten realisieren. Die geringere Rotorerwärmung trägt zum einen zu einer verminderten Lagerbelastung bei, was zu einer höheren Lagerlebensdauer bzw. zu längeren Instandhaltungszyklen führt. Zum anderen tritt das unerwünschte sogenannte Spindelnasenwachstum (Längung der Rotorwelle) nur in vermindertem Umfang ein, was für die Erzielung hoher Werkstückqualitäten unter Einhaltung enger Toleranzen unerlässlich ist [CHA03]. Auch wenn die Hauptspindel meist das Aggregat mit der höchsten Anschlussleistung einer Werkzeugmaschine ist, ist der Anteil am Gesamtenergiebedarf vorwiegend untergeordnet. Die maximale Leistung wird nur für Beschleunigungsvorgänge abgerufen, im Eingriff liegt die el. Leistungsaufnahme deutlich unter diesem Wert [DUF12].

## 2.2.2 Maschinenkühlung

Nahezu jede Werkzeugmaschine benötigt Kühlleistung in Form von Kaltwasser, welches von einem Rückkühler bereitgestellt werden muss. Hauptspindeln und Lineardirektantriebe werden beispielsweise wassergekühlt ausgeführt, um hohe Dauerleistungen über einen längeren Zeitraum bereitstellen zu können und um die thermische Längendehnung dieser genauigkeitsrelevanten Baugruppen möglichst gering zu halten. Auch das Maschinenbett und

der Kühlschmierstoff werden häufig temperiert, um eine hohe Bearbeitungsqualität sicherstellen zu können. Hydrauliksysteme, die über Öl-Wasser-Wärmetauscher und Schaltschränke, welche über Luft-Wasser-Wärmetauscher temperiert werden, sind weitere Beispiele für die vielfältigen Einsatzgebiete von Kühlsystemen.

Der Kühlbedarf errechnet sich aus der Summe der notwendigen Wärmeabfuhr in den Verbrauchern bei maximaler Auslastung und maximaler Einsatz-Umgebungstemperatur. Die Dimensionierung der Umwälzpumpe folgt aus der Summe des notwendigen Durchflusses und des Druckverlustes in den Verbrauchern, sowie der Verrohrung. Im Bereich der Kühlmittelumwälzung kann eine weitere Effizienzsteigerung erreicht werden, indem durch drehzahlgeregelte Pumpen der Durchfluss an den aktuellen Maschinenzustand angepasst wird.

Die nachstehende Tabelle 2-3 zeigt die zur Kaltwassererzeugung verfügbaren Technologien im Vergleich:

Tabelle 2-3: Vergleich verschiedener Rückkühlkonzepte

Art der Regelung	Investitionskosten	Wirkungsgrad	Wirtschaftlichkeit	Geräuschverhalten	Temp.-Hysteres	Lastbereich	Bemerkung
1 2 Punkt Regelung (Standard)	+++	+	+	-	---	+	Niedrigste Investitionskosten. Einsatz wenn auf Temperaturstabilität und Energieeffizienz kein Wert gelegt wird.
2 HGBP-Regelung	+	-	-	-	+	-	Energievernichtung Anwendung nur für einen Lastbereich von 25-100%. 0-25% kann nicht abgedeckt werden.

3	HGBP+ Nach-einspritzung	-	--	--	-	++	+++	Energievernichtung, Anwendung für den Lastbereich von 0 – 100 % geeignet
4	Inverter-Regelung	-	+++	+++	+++	+++	+	Für Lastbereich von 20-100 % geeignet.
4	Digital-Scroll	-	+++	+++	+	+++	+	Für Lastbereich von 10-100 % geeignet.
4	Kaltwasser-beimischung	+	+++	+++	-	++	++	Für Lastbereich von 0-100 % geeignet. Jedoch größerer Raumbedarf für den Tank. Speicherwirkung ist abhängig von der Umgebungstemperatur

### 2.2.3 Kühl- Schmierstoffsystem

Der Energiebedarf von spanenden Werkzeugmaschinen wird maßgeblich auch durch die Kühlschmierstoff (KSS)-Versorgung beeinflusst. Aus diesem Grund ist die prozessorientierte Auswahl und Konstruktion des KSS-Systems für eine energieeffiziente Gestaltung von Prozess und Maschine von besonderem Interesse.

Die Kühlschmierstoff Versorgung erfüllt nach [PAU08] in der Zerspanung drei Aufgaben:

- Abführung der an der an der Spanentstehungsstelle entstehenden Wärme,
- Reibungsminderung und
- Abtransport der entstehenden Späne (besonders beim Bohren und Fräsen).

Kuschmierstoff (KSS) im Hochdruckbereich wird beim Bohren und Fräsen bei Werkzeugen mit innerer Kühlmittelzufuhr durch die Hauptspindel

zur Kühlung, Schmierung und zum Spanabtransport eingesetzt. Bei herkömmlichen Systemen wird die Schraubenspindelpumpe über einen Motor mit nahezu konstanter Drehzahl direkt am Netz betrieben und fördert ihren gesamten Volumenstrom gegen ein fest eingestelltes Druckregelventil [ABE14].

Das Niederdruck-Kühlschmierstoffsystem versorgt die Bettspülung bzw. Spänerinne, die Spülung der Werkstückaufnahme sowie die Arbeitsraumduche. Je nach Ausführung der Maschine, kann die Niederdruckanlage auch den Vorlauf zum Hochdruck-KSS-System versorgen [ABE14].

Abgesehen von Sonderanwendungen für Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung, ist die Überflutungskühlung, bei der im Prozess größere Mengen an Kühlschmierstoff auf die Spanentstehungsstelle aufgebracht werden, die bisher meist eingesetzte Kühlmethode. Je nach Einsatzgebiet bzw. Prozessanforderungen wird an das Gesamtsystem der KSS Versorgung die Bedingungen eines möglichst großen, zugeführten Volumenstroms (z. B. für eine möglichst große Kühlwirkung bei Drehprozessen) oder eines möglichst hohen Druckes (z. B. zur Späneabfuhr bei Bohrvorgängen) gestellt. Da sich die Anforderungen an die Pumpenleistung bzw. Druck und Volumenstrom zwischen den Hoch- und Niederdruckanwendungen stark unterscheiden findet man in Werkzeugmaschinen überwiegend zwei verschiedene Pumpentypen vor, Verdrängerpumpen (z. B. Schraubenspindelpumpen) im Hochdruckbereich und Strömungsmaschinen (z. B. Kreiselpumpen) im Niederdruckbereich.



## 2.2.4 Hydrauliksystem

Innerhalb von Werkzeugmaschinen erfüllen Hydrauliksysteme eine Vielzahl von Aufgaben, welche von einfachen Hilfsfunktionen wie das Spannen von Werkstücken als auch Werkzeugen über den Betrieb hydrostatischer Lager bis hin zum kompletten Antrieb einzelner Hauptachsen reichen [FIN06].

Ein Hydrauliksystem besteht im Allgemeinen aus einer Antriebsmaschine, welche dem Hydrauliksystem mechanische Leistung zuführt. Die mechanische Leistung wird daraufhin durch eine Pumpe in hydraulische Leistung umgewandelt und mittels Druckflüssigkeit über Leitungen und Ventile, welche den Weg, Druck oder Volumenstrom der Druckflüssigkeit beeinflussen, dem Aktor zugeführt. Der Aktor wandelt die hydraulische Leistung wieder in mechanische Leistung zurück, um damit den Antrieb einer Arbeitsmaschine zu ermöglichen (vgl. Bild 2-17). Dabei ist das Verhältnis der abgegebenen mechanischen Leistung zur zugeführten mechanischen Leistung der Gesamtwirkungsgrad des Hydrauliksystems. Zu den Verlusten innerhalb des Systems zählen beispielsweise Drosselverluste, welche so gut wie in jedem Bauteil auftreten [BAU08].

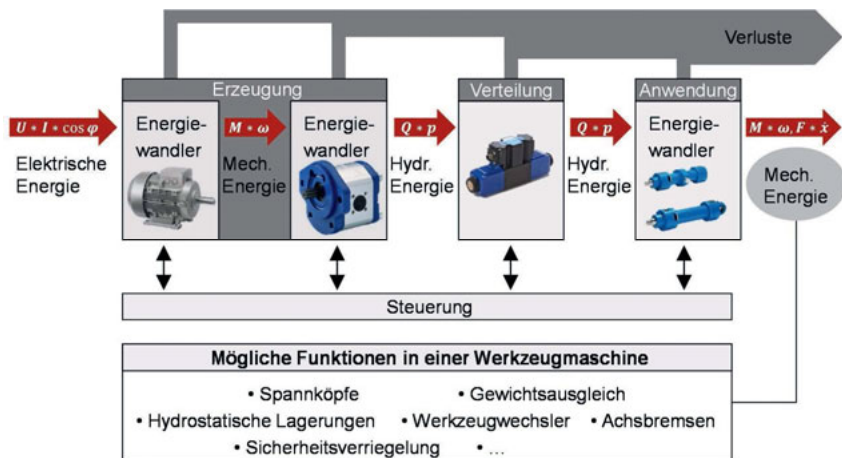


Bild 2-17: Allgemeiner Aufbau eines Hydrauliksystems

Aber nicht nur die Auswahl einzelner Hydraulikkomponenten ist für den Energiebedarf verantwortlich. Auch die Verschaltung der einzelnen Komponenten untereinander ist hierfür maßgeblich. So finden in Werkzeugmaschinen, auf Grund der geringen Investitionskosten, oft Druckquellen in Form von Konstantpumpen mit parallelgeschalteten Druckbegrenzungsventilen (DBV) Verwendung [WIL14]. Hydropumpen mit drehzahlgeregelten Antrieben (DKP) können im Vergleich hierzu allerdings deutlich effizienter arbeiten [KUH09]. Neben diesen zwei Druckquellen werden vor allem noch Abschalt pumpen/Druckloser Umlauf (DU) und Verstellpumpen (VP) genutzt. Bild 2-18 zeigt beispielhaft den Energiebedarf von verschiedenen Druckquellen für ein Referenzszenario auf.

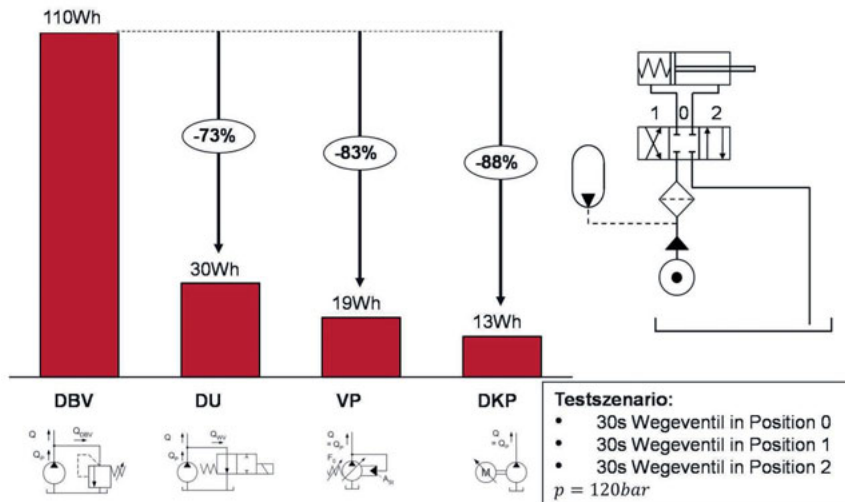


Bild 2-18: Energiebedarf von verschiedenen Druckquellen

### Vorteil von Hydrauliksystemen:

- Sehr hohe Energiedichte und damit kleiner Bauraum
- Gute Regelbarkeit
- Geringe Energiewandlungsverluste

## 2.3 Gesamtverbrauch von Maschinen und Anlagen

*Ph. Eberspächer*

Betrachtet man die Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen, so ergibt sich ein Anteil der Energiekosten von 17% (siehe Bild 2-19); dies ergab eine am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt durchgeführte Analyse [DEV08]. Untersuchungen im EU-Projekt ECOFIT [ZUL10] unter anderem

am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart ergaben, dass der Großteil dieser Energiekosten und damit des Energieverbrauchs während der Betriebsphase der Werkzeugmaschine anfällt. Somit können auch die Druckluftkosten (siehe Bild 2-19), die selbst meist als zusätzliche Energiekosten anfallen, zu einem Großteil zu den 17% Energiekosten hinzuaddiert werden.

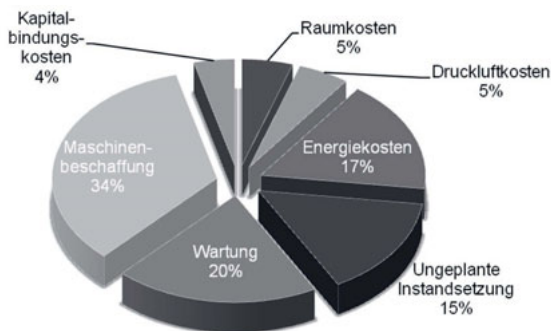


Bild 2-19: Lebenszykluskosten von Werkzeugmaschinen 2008

Angaben zum Leistungsbedarf von Werkzeugmaschinen sind bisher typischerweise dem Typenschild zu entnehmen und beschränkten sich auf den maximalen Bedarf um eine ausreichende Anschlussleistung sicherzustellen. Außer Acht gelassen wird bisher jedoch meist der tatsächliche Leistungsbedarf. Um dieser Schwachstelle gerecht zu werden, wurden innerhalb der Forschergruppe ECOMATION, detaillierte Analysen der Leistungsaufnahme von Werkzeugmaschinen durchgeführt. In Bild 2-20 ist der beispielhafte Verlauf der Leistungsaufnahme einer Fräsmaschine in ihren unterschiedlichen Betriebsphasen dargestellt. Mit maximaler Auslastung ist darin der Bereich der Leistungsaufnahme markiert, der erreicht wird, wenn durch Fräsparemeterwahl die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Hauptspindel erreicht

werden. Deutlich zu erkennen sind im Leistungsverlauf die unterschiedlichen Leistungsniveaus, die den verschiedenen Verbrauchergruppen bzw. Betriebszuständen zugeordnet werden können. Betrachtet man nun die Anteile der Leistungsaufnahme so wird deutlich, dass auch zu Zeiten eines inaktiven Fertigungsprozesses, d.h. es findet keine Wertschöpfung statt, dennoch ein hohes Maß an Leistung benötigt wird. Daher sind zum einen die Verbraucher zu identifizieren, zum anderen ist deren Notwendigkeit im jeweiligen Betriebszustand zu überprüfen.

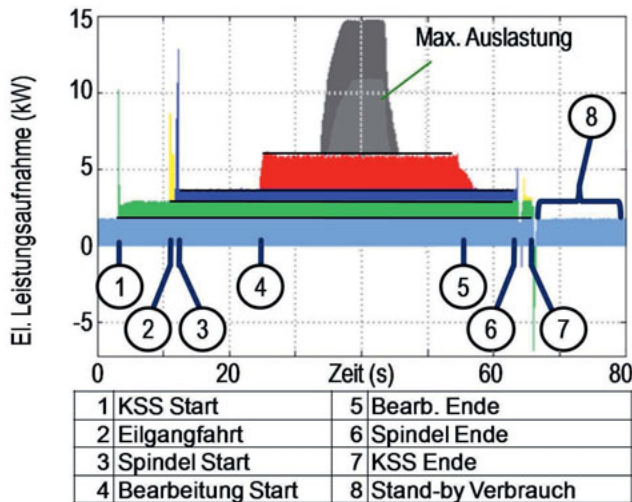


Bild 2-20: Typische Leistungsaufnahme und Betriebsphasenübergänge einer Fräsmaschine

## 2.4 Gesamtverbrauch der Produktion

*S. Wahren, E. Colangelo, Th. Bauernhansl*

Energie ist ein zentrales Produktionsmittel in Industrie und Gewerbe. Eine ausreichende, sichere und wirtschaftliche Energieversorgung bildet eine wesentliche Grundlage unseres Wohlstandes. Energie ist ebenso aber auch ein

Kostenfaktor. Da in vielen Industriebranchen die Energiekosten nur einen Bruchteil der gesamten Produktionskosten darstellen, hat das Thema Energie zu oft einen untergeordneten Stellenwert. Nur in energieintensiven Industriezweigen weisen die Energiekosten einen nennenswerten Anteil an den Produktionskosten auf. Stellt man jedoch die Energiekosten in Beziehung zum Gewinn eines Unternehmens, sieht man, dass diese durchaus einen Stellenwert haben und eine relevante Stellschraube ist um Kosten zu sparen und so einen Wettbewerbsvorteil zu erlangen.

Die zunehmende Sensibilisierung der Unternehmen für das Thema Energieeffizienz ist in erster Linie eine Reaktion auf die externen Treiber wie steigende Energiepreise und Klimaschutz. Ein weiterer Aspekt ist die Tatsache dass die Potenziale in der Produktion zur Senkung der Kosten, wie beispielsweise Reduzierung der Durchlaufzeiten und Minimierung von Beständen, zunehmend erschöpft sind. Energieeffizienz ist dahingegen ein vernachlässigtes Thema, bei dem jedoch mit geringem Aufwand zahlreiche Potenziale gehoben werden können. Die Betrachtung der Energieverwendung in einem komplexen System, wie einer Produktion, mit dem Ziel Energieverschwendung durch unsachgemäßen Gebrauch dieser, zu minimieren und energienutzende Systeme optimal zu gestalten, ist daher eine lohnenswerte Aufgabe.

Neben der Berücksichtigung der Ressourcen der Hauptprozesse sind auch die vorhanden Prozesse und Anlagen der Peripherie mit zu berücksichtigen. Nach [SCH01], [ENG09] sind diese Teilsysteme oftmals für einen Großteil des Energieverbrauchs eines Unternehmens verantwortlich. Die Betrachtung des Energieverbrauchs anhand der einzelnen peripheren Systeme stellt somit einen grundlegenden Schritt zur energetischen Optimierung dar, weil dadurch Einflussparameter auf die Subsysteme identifiziert werden können.

[ENG09], [MUE09]. Nach Schenk/Wirth [SCH04] können die peripheren Systeme in Systeme erster, zweiter und dritter Ordnung gegliedert werden:

- Die 1. Peripherie umfasst Systeme, die direkt von Produktionsprogramm und somit von den Hauptprozessen abhängen
- Die 2. Peripherie beinhaltet Anlagen, die zwar nicht vom Produktionsprogramm, aber direkt von den Hauptprozessen abhängig sind
- Die 3. Peripherie fasst Anlagen, die nicht von den Hauptprozessen abhängig sind, zusammen [SCH04].

Die **Kühlschmierstoffversorgung** (KSS) kann der ersten Peripherie zugeordnet werden, da das System direkt vom Hauptprozess und dem Produktionsprogramm abhängig ist. Die Hauptaufgabe besteht in Kühlung, der Schmierung, der Spülung und den Späneabtransport. Entsprechende Systeme können zentral oder dezentral ausgeführt werden.

Die **Druckluftversorgung** kann der zweiten Peripherie zugeordnet werden. Dies bedeutet, dass es sich zwar um einen maschinennahen Prozess handelt, der von den Hauptprozessen abhängig ist, jedoch nicht direkt vom Produktionsprogramm. Druckluft wird in der Industrie als Energieträger eingesetzt. Druckluftsysteme bestehen aus Komponenten zur Erzeugung (z.B. Kompressoren), zur Aufbereitung (z.B. Filter, Trocknungsanlagen) und zur Verteilung (z.B. Leitungsnetz). Obwohl Luft unbegrenzt und kostenlos zur Verfügung steht, ist die Erzeugung und Nutzung von Druckluft vergleichsweise kostenintensiv. Der durchschnittliche Wirkungsgrad von Druckluftanlagen, abhängig vom Alter und dem allgemeinen Zustand, beträgt nur 5 bis 20 %. Maßnahmen wie die Reduzierung von Leckagen, eine optimale Wartung, der

Einsatz energieeffizienter Komponenten oder die Wärmerückgewinnung aus der Kühlung können den Wirkungsgrad steigern.

Die Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Anlage (HLK) sowie die Beleuchtung sind Systeme, die unabhängig von den Hauptprozessen sind und auch nicht direkt durch das Produktionsprogramm beeinflusst werden. Diese Systeme können der 3. Peripherie zugeordnet werden. Die **Beleuchtung** ist jedoch in der Regel abhängig von dem Schichtmodell. Die Beleuchtung macht in der Industrie nur einen kleinen Teil des Endenergieverbrauchs aus [MUE09]. Trotzdem ist eine Berücksichtigung sinnvoll, da eine Optimierung im Vergleich zur Optimierung der anderen peripheren Systeme meist mit geringem Aufwand durchgeführt werden kann.

Lufttechnische Anlagen (**Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Anlagen**) sind Anlagen zum Transport und zur Aufbereitung von Luft und werden in vielen Bereichen eingesetzt. Lüftungsanlagen haben unterschiedliche Aufgaben bzw. werden aus vielfältigen Gründen installiert:

- Kühlung: Zur Kühlung bei großen internen Wärmelasten (Personen, Geräte) und bei der Sommerhitze.
- Heizung: als Raumheizung.
- Luftkondition: Zum Beispiel in der Reinraumtechnik, im Operationsaal oder bei der Papier- oder Textilverarbeitung.

Zentrale Optimierungskriterien im Bereich der HLK-Versorgungssysteme stellen ein strukturiertes Luftführungskonzept, sowie die Wahl eines geeigneten Heizkonzepts dar. Weitere Ansatzpunkt sind die Anpassung der Be-



triebsparameter an den tatsächlichen Bedarf und eine Optimierung der Anlage unter energetischen Gesichtspunkten wie zum Beispiel die Verwendung einer Steuerung und Regelung, Einsatz energieeffizienter Ventilatoren und Motoren, Überprüfung des Leitungssystems auf Druck- und Temperaturverluste durch Leckagen sowie der Einsatz einer Wärmerückgewinnung.



---

## 3 Energiebedarfsmodellierung

### 3.1 Modelle des Dreh- und Fräsprozesses

*S. Braun*

Die Modellbildung für den Dreh- und Fräsprozess beinhaltet mehrere wesentliche Gesichtspunkte. Essentieller und fundamentaler Bestandteil für beide Verfahren ist die Formulierung eines zweckmäßigen Ansatzes zur Vorhersage der Zerspankräfte. In der Literatur sind hier verschiedene Ansätze bekannt, von denen zwei eine wesentliche Bedeutung für den Praxiseinsatz erlangt haben. Zum einen ist es eine Formulierung auf Basis linearer Schnittkraftkoeffizienten, wie es Altintas et al beispielsweise in ihrem Programmsystem "CutPro" verwenden [ALT03, ALT06]. Diese Formulierung kann durch sog. Edge-Coefficients noch verfeinert werden. Der zweite Ansatz ist das empirische Schnittkraftgesetz von Kienzle-Viktor [KIE57]. Beide Ansätze sind empirischer Natur, d.h. es ist unumgänglich, die entsprechenden Koeffizienten für jede spezielle Kombination aus Werkzeug und insbesondere Werkstückwerkstoff zu identifizieren. Dies muss mittels Zerspanversuchen erfolgen, aus denen bei Variation der Zerspan-/Technologieparameter die entsprechenden Koeffizienten identifiziert werden. Dieser Nachteil ist grundsätzlich gegeben und muss auch für die Parametrierung der Modelle im Rahmen von ECOMATION in Kauf genommen werden. Um die Zerspankraftgesetze zur Vorhersage der Schnittkräfte anwenden zu können, muss die momentane grundlegende Spangeometrie bekannt sein. Dies setzt

wiederum voraus, dass die momentanen Eingriffsbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstoff an jedem Bahnpunkt der Werkzeugbahn zumindest näherungsweise bekannt sein müssen. Daher ist ein zweiter wesentlicher Bestandteil des Prozessmodells sowohl für das Drehen als auch für das Fräsen die Ermittlung der momentanen Eingriffsbedingungen entlang des Werkzeugwegs. Das Prozessmodell muss letztendlich unter Berücksichtigung der Maschinenkinematik die ermittelten Zerspankräfte in Abhängigkeit der aktuellen Eingriffsverhältnisse komponentenweise auf die physikalischen Maschinenachsen projizieren, um die tatsächlich auf die Antriebe bzw. die Hauptspindel wirkenden Kräfte und Momente als Lasten für das Maschinenmodell und dessen Komponentenmodelle übergeben zu können. Ein letzter wichtiger Aspekt ist die – zumindest näherungsweise – Abschätzung nichtenergetischer Effekte wie bspw. thermische Beanspruchung der Zerspanzone oder Verschleißfortschritt und Belastung des Werkzeugs, um bei Variation von Prozessparametern, insbesondere Vorschubgeschwindigkeit oder Spindeldrehzahl, Auswirkungen auf nichtenergetische Größen abschätzen zu können und entsprechende Limits bei Überschreitung von Grenzwerten angeben zu können.

Da der Aufbau des Prozessmodells und seine Einbindung in die gesamte Simulations- und Modellumgebung für Dreh- und Fräsprozess grundsätzlich identisch sind, sei an dieser Stelle in Bild 3-1 die gesamte virtuelle Modellumgebung zur energetischen Simulation einer Bearbeitung gezeigt.

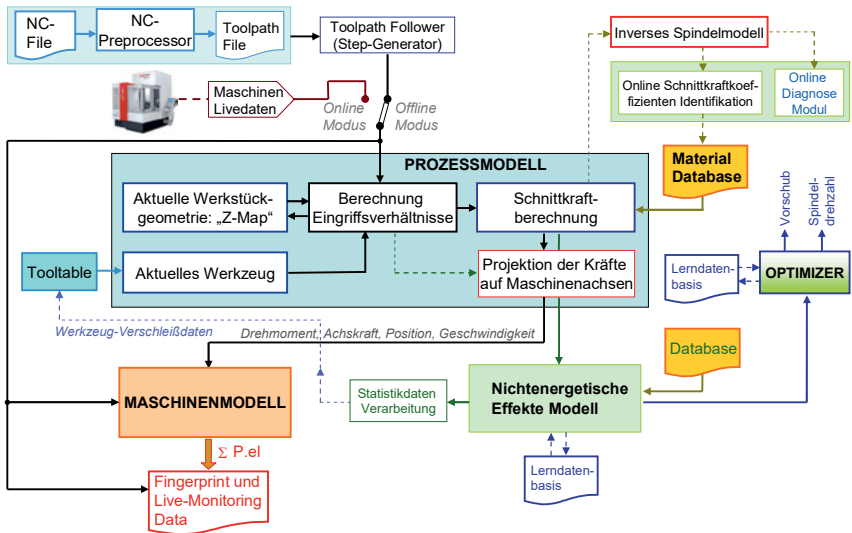


Bild 3-1: Blockdiagramm der ECOMATION Offline-Simulationsumgebung

Mit dieser Simulationsumgebung ist es möglich, die Leistungsaufnahme und den Energieverbrauch in virtuellen Simulationsläufen mit realen NC-Programmen vorherzusagen. Durch Austausch entweder des gesamten Maschinenmodells (d.h. virtueller Wechsel der Ressource) oder einzelner Maschinenkomponentenmodelle innerhalb eines Maschinenmodells können bereits in der Planungsphase energetische Optimierungen erfolgen. Durch Änderungen an den NC-Programmen können die energetischen Auswirkungen verschiedener Prozessführungen simuliert werden. Letztlich erlaubt das System sog. energetische Fingerprints einer Bearbeitungsoperation zu erstellen, die dem Prozess- und Fertigungsplaner als Grundlage für Operations-, Ressourcen- und Belegungsplanungen und -optimierungen dienen.

### 3.1.1 Prozessmodell Drehen

Das eigentliche Zerspan- bzw. Prozessmodell für den Bearbeitungsfall Drehen beruht auf einer Formulierung nach dem empirischen Zerspankraftgesetz von Kienzle-Viktor [KIE57]. Die resultierende Schnittkraft  $\{F\}$  kann in die drei Hauptkomponenten Schnittkraft  $F_c$  in tangentialer Richtung, Vorschubkraft  $F_f$  in Axialrichtung und Passivkraft  $F_p$  in radialer Richtung zerlegt werden. Die 1957 empirisch gefundene Beziehung lautet:

$$\{F\} = K_{WV} \cdot \begin{cases} F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \\ F_f = k_{f1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_f} \\ F_p = k_{p1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_p} \end{cases} \quad (3.1.1)$$

Sie ist eine Funktion der spezifischen Schnittkraftkoeffizienten  $k_{i1.1}$  und der Spangeometrieparameter  $b$  und Schnitttiefe  $h$ , welche abhängig vom Einstellwinkel  $\kappa$  des Drehwerkzeugs sind:

$$\begin{aligned} b &= \frac{a_p}{\sin \kappa} \\ h &= f_z \cdot \sin \kappa \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

Zusätzliche Korrekturterme sind in der Literatur bekannt, wurden aber für die vorliegende Anwendung aus Einfachheitsgründen bis auf einen Korrekturfaktor zur Einbeziehung fortschreitenden Werkzeugverschleißes vernachlässigt. Der fortschreitende Werkzeugverschleiß wird über den Korrekturfaktor  $K_{WV}$  im Wertebereich von  $1 \leq K_{WV} \leq 1.5$  eingerechnet. Der aktuelle Wert von  $K_{WV}$  ist eine Ausgangsgröße des Werkzeugverschleißmoduls, welches später erläutert wird.

Im Allgemeinen wird mit den grundlegenden Schnittparametern  $a_p$  und Vorschub  $f_z$  die Spangeometrie nach (3.1.2) bestimmt und damit die Schnittkraft

$\{F\}$  nach (3.1.1) abgeschätzt. Die Berechnung der Spangeometrie erfolgt in diskreten Zeitschritten entlang der Werkzeugtrajektorie mithilfe geometrischer Operationen zwischen ungeschnittener Werkstückgeometrie und Werkzeug (analytisch-numerische Swept-Volume-Methode auf einer Punktwolke, welche die momentane Werkstückaußenkontur beschreibt). Dies hat den Vorteil, dass damit ein Tool zur Verfügung steht, um beliebige Werkzeugtrajektorien mit beliebigen Werkzeug-/Schneidengeometrien auf beliebigen Werkstückgeometrien abfahren zu können. Damit können die entstehenden Spangeometrien sowohl bei Dreh- als auch Fräsoperationen berechnet werden. Die Beschreibung der Geometrien erfolgt über einfache parametrische Eingabe der Rohteilkontur oder optional einen CAD-Datensatz.

Die spezifischen Schnittkraftkoeffizienten  $k_{il,l}$  und Exponenten  $m$  müssen aus der Literatur für den jeweiligen Anwendungsfall und Werkstoff entnommen werden oder experimentell ermittelt werden. Dies stellt einen Nachteil der Methode dar, insbesondere sind die Werte mit größer werdenden Unsicherheiten behaftet, wenn die tatsächlichen Schnittbedingungen von der Standardkonstellation der Zerspanversuche zur Bestimmung der  $k_i$  abweicht. Andere Zerspanmodelle benutzen ein lineares Schnittkraftgesetz wie bspw. in [ALT03, ALT06]. Neueste Ansätze zur Schnittkraftvorhersage [ZEK07] basieren auf energetischen Betrachtungen und kommen ohne spezifische Schnittkraftkoeffizienten aus, verlangen dafür aber sehr präzise Beschreibungen der Werkstoff- und Reibungseigenschaften und sind zeitaufwändig in der Berechnung, da sie iterativer Natur sind.

Nachdem die Berechnung der zum momentanen Zeitschritt wirkenden Zerspankraft erfolgt ist, kann damit unter Einbeziehung der Werkzeug- und

Werkstückgeometrie - hier ist der aktuelle Schnittdurchmesser  $X$  das entscheidende Maß - das Lastmoment auf die Hauptspindel berechnet werden. Aus den auf die Maschinenachsen projizierten Zerspankraftkomponenten der Vorschub- und Passivrichtung folgen die Vorschubkräfte für die Vorschubachsen  $X$  und evtl.  $Y$ . Alle diese Lasten werden den Modellen der Maschinenkomponenten – im Speziellen dem Hauptspindelmodell und den Vorschubachsmodellen – als Lasten übergeben und daraus die elektrische Leistungsaufnahme ermittelt. Für die Simulationen im Teilprojekt 5 wurden teils eigene Modelle entwickelt, im Allgemeinen kommen die Komponentenmodelle aus TP 4 zur Anwendung.

Die rein mechanische Zerspanleistung ergibt sich zu:

$$P_c = F_c \cdot v_c . \quad (3.1.3)$$

Die Differenz zwischen mechanischer Zerspanleistung und aufgenommener elektrischer Leistung der Antriebe kann als ein Maß für die Effizienz der Antriebskomponenten der Maschine herangezogen werden.

#### ***Nichtenergetische Effekte***

Zu geringe Vorschubraten fördern die Bildung von langen Spiralspänen oder gar Wirr- und Bandspänen. Um beim späteren Einsatz von Energieregulgorithmen auf der Steuerung Technologieparameterbereiche abgrenzen zu können, wurde ein Ansatz entwickelt, der eine qualitative Prognose der zu erwartenden Spanformen ermöglicht. Das System basiert auf künstlichen Neuronalen Netzen mit Feed-Forward Struktur (FF-ANN). Das Netz kann selbstlernend oder mit fixen Trainingsdatensätzen („Targets“) konfiguriert werden.



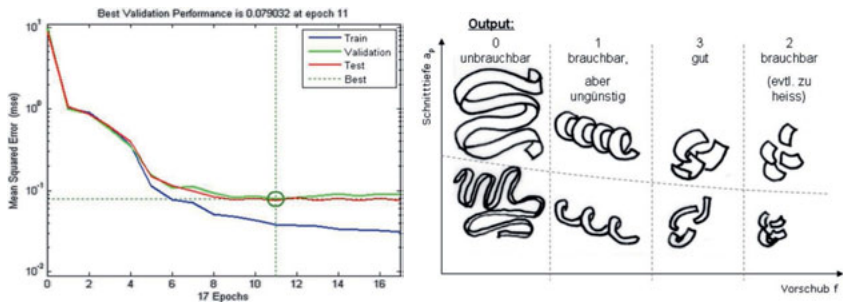


Bild 3-2: Performance des Neuronalen Netzes zur Klassifizierung der zu erwartenden Spanformen (links), Spanform-Akzeptanzklassen (rechts)

Die Input-Struktur des Netzes besteht aus 7 Eingängen: den drei Technologieparametern  $v_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$  (wobei die Eingänge auf die empfohlenen Schnittdaten des Werkzeugherstellers normiert sind) und Klassifikationen des bearbeiteten Werkstoffs, des Schnittwinkels des Werkzeugs, der Kühlfähigkeit des Kühlschmierstoffs und dem Verschleißzustand. Die Zuordnung der Technologieparameter  $v_c$ ,  $f_z$ ,  $a_p$  auf die qualitativen Eingangsklassen ["niedrig – mittel – hoch"] im Eingangslayer erfolgt wie in Bild 3-3, wobei die x-Positionen der Klassenwechsel willkürlich an den Grenzen des Normalbereichs von  $\pm 15\%$  um die Herstellerempfehlung gelegt sind.

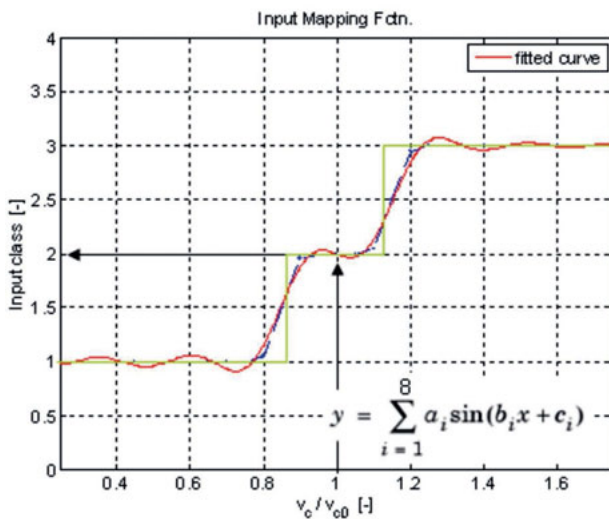


Bild 3-3: Zuordnung der Technologieparameter auf die qualitativen Eingangsklassen [niedrig – mittel – hoch] im Eingangslayer über eine Mapping-Funktion

Die Ausgänge des neuronalen Netzes sind: Spanform, klassifiziert in [„nicht brauchbar – schlecht – brauchbar – gut“], Thermische Last auf das Werkzeug und prognostizierte Geschwindigkeit des Verschleißfortschritts.

Das Training des Netzes erfolgte nach Levenberg-Marquardt. Die Beurteilung der Ausgangsgrößen in Abhängigkeit der Eingangsgrößen erfolgte aus Erfahrungswerten aus der Literatur sowie auf Basis der Zerspanversuche beim Drehen und einer Klassifizierung durch das Werkstattpersonal des IfWs während der täglichen Arbeit mit der Drehmaschine. Die Performance, ausgedrückt im durchschnittlichen Fehler mse (mean least squares error), wird bei  $mse = 0.079$  als befriedigend erachtet. Tests mit realen Daten verliefen zufriedenstellend und lagen nahe bei den Validierungsdatensätzen.

Weitere nichtenergetische Kenngrößen, welche das Modell näherungsweise abbildet, sind Aufteilung der entstehenden Zerspanungswärme auf Späne, Schneide und Werkstück, Abschätzung von entstehenden Temperaturen und Verschleißrate des Werkzeugs, die mechanische Werkzeugbelastung und eine Abschätzung der Oberflächenrautiefe am Werkstück. Diese wird für den Drehprozess als vereinfachte theoretische Rautiefe  $R_{th}$  ausgegeben nach:

$$R_{th} = \frac{f^2}{8 \cdot r_z} \quad (3.1.4)$$

mit  $f$  als Vorschub je Umdrehung und  $r_z$  als Schneidkantenradius.

Die Modelle der thermischen Kenngrößen und des Verschleißfortschritt sind beim Drehprozessmodell analog zum Fräsmodell umgesetzt und werden im folgenden Kapitel erläutert. Die gesamte algorithmische Umsetzung in Programmcode erfolgte innerhalb Matlab/Matlab-Simulink® und ist nach Anpassungen und Kompilierung echtzeitfähig.

### ***Abgleich von Simulationsmodell und Messung für das Drehen***

Alle drei Komponenten der Zerspankraft beim Drehen lassen sich mit sehr guter Übereinstimmung zu den experimentellen Ergebnissen durch das gewählte Zerspanmodell wiedergeben. Die Gesamt-Maschinensimulation zeigt ebenfalls sehr gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Die Leistungsaufnahme der Vorschubantriebe ist für die gemessene Drehmaschine nahezu unabhängig von den wirkenden Prozesskräften und im Vergleich zur Leistungsaufnahme der Hauptspindel vernachlässigbar klein.

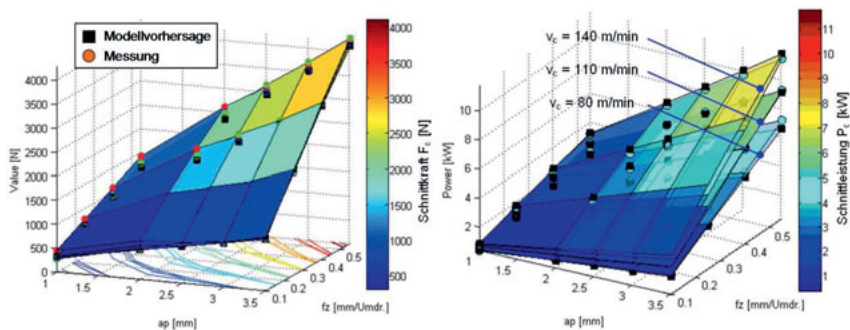


Bild 3-4: Vergleich von Messung und Modellvorhersage für Schnittkraft  $F_c$  und Hauptspindleleistung  $P_c$

Die reale Bearbeitung des Referenz-Wellenteils aus 42CrMoV4 wurde virtuell auf der fertig gestellten Offline-Simulationsumgebung der Drehmaschine „Gildemeister CTX 420 linear“ simuliert [vgl. VER11a, HEI12a, HEI12b, HEI13]. Der simulierte Energieverbrauch und die Leistungsaufnahme decken sich mit den experimentellen Ergebnissen. Die Genauigkeit beträgt in etwa 5%. Die Ursachen für die verbleibenden geringen Abweichungen sind v. a. in den nicht exakt vorhersagbaren Einschaltintervallen von Kühlaggregaten und der Hydraulikpumpe zu finden. Zur Beurteilung der Abhängigkeiten des Energieverbrauchs von Prozess-Eingangsgrößen und zur Identifikation wirksamer Stellgrößen für den Verbrauch wurden virtuelle Bearbeitungen mit der abgeglichenen Simulationsumgebung durchgeführt.

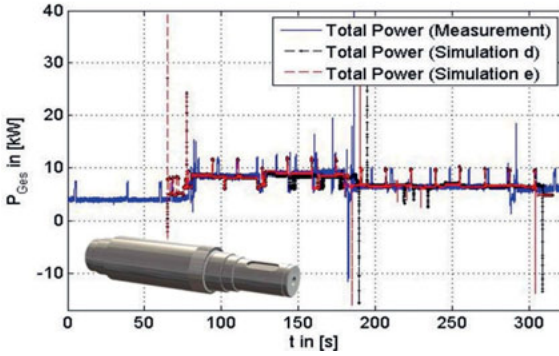


Bild 3-5: Vergleich von Messung und Modellvorhersagen für die Gesamtleistungsaufnahme  $P$  bei der Referenz-Drehbearbeitung

### 3.1.2 Prozessmodell Fräsen

Der echtzeitfähige Algorithmus für das dreiachsige Fräsen wurde in Matlab® programmiert. Seinen Kern bildet die Implementation der Schnittkraftgesetze, z. B. die Formulierung nach Kienzle-Viktor (Gl. 3.1.5, [KIE57]). Alternativ lässt sich eine Formulierung auf Basis linearer Schnittkraft-Koeffizienten gemäß 3.1.6, wie sie Altintas *et al* [ALT03, ALT06] einsetzt, anwählen. Die gesamte Schnittkraft  $\{F\}$  lässt sich in die tangential wirkende Komponente  $F_t$ , die Radialkraft  $F_r$  und die Axialkraft  $F_a$  aufteilen:

$$\{dF\} = K_{WV} \cdot \begin{Bmatrix} dF_t = k_{tc1.1} \cdot dz \cdot h(\phi, z)^{1-m_c} \\ dF_r = k_{rc1.1} \cdot dz \cdot h(\phi, z)^{1-m_f} \\ dF_a = k_{ac1.1} \cdot dz \cdot h(\phi, z)^{1-m_p} \end{Bmatrix} \quad (3.1.5)$$

$$\{dF\} = K_{WV} \cdot \begin{Bmatrix} dF_t = [k_{tc} \cdot h(\phi(z)) + k_{te}] \cdot dz \\ dF_r = [k_{rc} \cdot h(\phi(z)) + k_{re}] \cdot dz \\ dF_a = [k_{ac} \cdot h(\phi(z)) + k_{ae}] \cdot dz \end{Bmatrix} \quad (3.1.6)$$

Eine Korrektur, die dem fortschreitenden Werkzeugverschleiß Rechnung trägt, ist in Form eines Korrekturfaktors  $K_{WV}$  im Wertebereich von  $1 \leq K_{WV} \leq 1.5$  eingerechnet. Der aktuelle Wert von  $K_{WV}$  ist eine Ausgangsgröße des Werkzeugverschleißmoduls, welches später kurz erläutert wird.

Die Schnitttiefe  $h$ , die im Allgemeinen eine Funktion des Eingriffswinkels  $\phi(z)$  ist, welcher über der Schnitttiefe zudem variieren kann, ist definiert zu:

$$h(\phi, z) = f_z \cdot \sin \phi(z) \quad (3.1.7)$$

Die aktuellen Eingriffsbedingungen des Werkzeugs und die daraus resultierenden Spanformen und Spanquerschnitte werden analog zur Simulation des Drehprozesses durch die Berechnung des geometrischen Verschnitts von Werkzeugkontur und Werkstück ermittelt, wobei hier eine Z-Map-Repräsentation der aktuellen Werkstückoberfläche zur Anwendung kommt. Diese Vorgehensweise limitiert den Einsatz des Prozessmodells in seiner jetzigen Form auf das dreiaxsiges Fräsen und das zweiachsige Drehen und lässt Unter- bzw. Hinterschnitte über der Eingriffshöhe unberücksichtigt. Für eine allgemeingültige Anwendbarkeit auf beliebige mehrachsige Prozesse bietet sich für die Zukunft der Übergang auf eine Solid-Model (CAD)-basierte Boole'sche Geometrieoperation an, deren Rechengeschwindigkeit jedoch deutlich geringer ist als der verwendete Ansatz.

Durch Projektion der Schnittkraftkomponenten  $\{F\}$  auf die Maschinenachsen werden die Achs-Vorschubkräfte und das anliegende Spindeldrehmoment berechnet:

$$\left\{ \begin{array}{l} dF_x(\phi(z)) = -dF_t \cdot \cos \phi(z) - dF_r \cdot \sin \phi(z) \\ dF_y(\phi(z)) = +dF_t \cdot \sin \phi(z) - dF_r \cdot \cos \phi(z) \\ dF_z = +dF_a \\ dM_{spindle} = \frac{D_{tool}}{2} \cdot z_{ct,engaged} \cdot dF_t \end{array} \right\} \quad (3.1.8)$$

Die Ausgangsgrößen Spindelmoment und Kräfte auf die Vorschubachsen werden den Modellen der Maschinenkomponenten aus Teilprojekt 4 als Lasten übergeben und daraus die elektrische Leistungsaufnahme ermittelt.

Durch die Repräsentation des Materialabtrags und der Eingriffsverhältnisse auf einer Z-Map der Werkstückoberfläche kommt es zwangsläufig zu Diskretisierungseffekten und –fehlern. Eine Abschätzung der Konvergenz des Algorithmus bei Erhöhung der Diskretisierungsfeinheit der Z-Map zeigt Bild 3-6. Bei einer Ortsauflösung feiner als 0.1 mm kann bereits von konvergen-tem Verhalten der Ergebnisgrößen gesprochen werden. Im Regelfall wird für das Modell eine Geometrieauflösung von 0.05 mm verwendet.

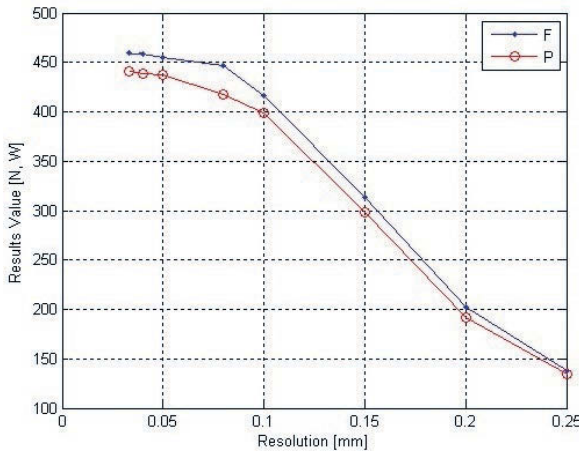


Bild 3-6: Konvergenzverhalten des Z-Map-Algorithmus bei Erhöhung der geometrischen Auflösung

### *Nichtenergetische Effekte*

Thermische Effekte bei der Zerspanung sind nicht nur im Zusammenhang mit der richtigen Kühlschmierstoffdosierung von Bedeutung sondern haben auch einen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß. Kühlschmierstoff (KSS) sollte ökonomisch in Abhängigkeit der aktuellen thermischen Verhältnisse dosiert werden, um Energie zu sparen.

Die Abschätzung der zu erwartenden Temperaturen fußt auf sehr stark vereinfachenden Ansätzen, anstatt detaillierte physikalische Modelle zu benutzen, da die Berechnung schnell vonstattengehen muss und im Hinblick auf energetische Aspekte des Zerspanprozesses lediglich Abschätzungen notwendig sind. Zur Parametrierung des verwendeten Ansatzes muss die Kühlfähigkeit  $K$  des KSS vorab experimentell in Abhängigkeit des Durchflusses und des Drucks identifiziert werden [SUK03]. Der Kühlfähigkeitsindex  $K$  beschreibt dabei das Verhältnis zwischen der durch den KSS abgeführten Wärme und der gesamten erzeugten Wärme bei der Zerspanung. Sind die Zeitverläufe von Aufheiz- und Abkühlkurven bei adäquater KSS-Zufuhr und unter Trockenbedingungen bekannt, so kann  $K$  näherungsweise bestimmt werden zu:

$$K = \frac{\int_{t_0}^{t_{end}} \dot{q}_{dry}(t) dt - \int_{t_0}^{t_{end}} \dot{q}_{cooled}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_{end}} (\dot{q}_{dry}(t) - \dot{q}_0) dt} \quad (3.1.9)$$

Eine weitere Möglichkeit, um über den KSS abgeführte Wärmemengen abschätzen zu können bilden sogenannte Boiling-Curves (Siedekurven Bild 3-7) aus Experimenten mit Wasserstrahlkühlung und Sprühnebelkühlung. Die (maximal abführbare) Wärmestromdichte kann aus den Kurven unter



Berücksichtigung der aktuell benetzten Oberfläche und bei Kenntnis von Temperatur der Oberfläche und Kühlmittel-Auftreffgeschwindigkeit abgeschätzt werden.

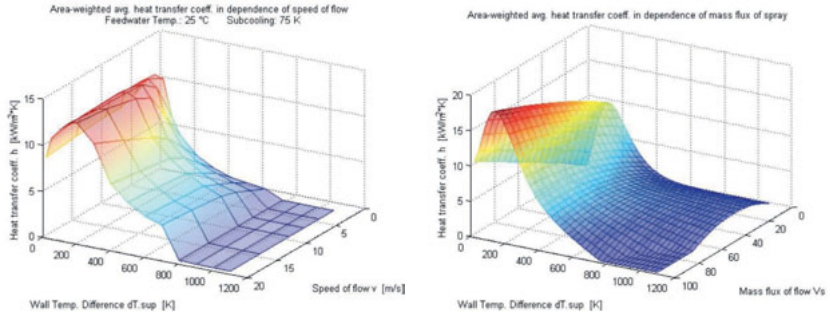


Bild 3-7: Boiling-Curves der erzielbaren Wärmestromdichte bei Wasserstrahlkühlung (links) bzw. Sprühnebelkühlung (rechts)

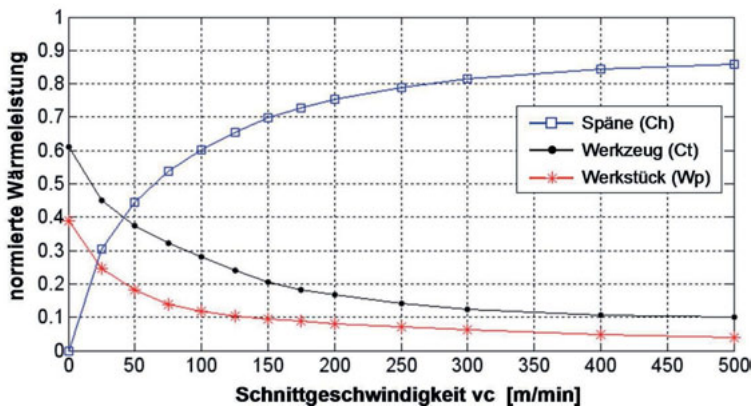


Bild 3-8: Wärmestromaufteilung bei der Zerspaltung gemäß Tönshoff *et al* [TÖN04]

Die weitere Herangehensweise bedient sich der empirischen Annahme, dass nahezu die gesamte mechanische Zerspanleistung  $P_c$  in Wärme umgesetzt wird. Der Wärmestrom bei Trockenbearbeitung teilt sich dabei in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  auf in einen Anteil in die Späne ( $\dot{Q}_{SP}$ ), das Werkzeug ( $\dot{Q}_{Ct}$ ) und das Werkstück ( $\dot{Q}_{Wp}$ ) gemäß [TÖN04] wie in Bild 3-8 dargestellt.

Nach Vieregge [VIE55] vermag die Wärmeleistung, welche mit dem Span abgeführt wird, bei Trockenbearbeitung eine maximale Spantemperatur von:

$$\vartheta_{Ch,max} = \vartheta_0 + \frac{\dot{Q}_{Ch}}{\rho_{Ch} \cdot c_{Ch} \cdot v_c \cdot h \cdot b} \quad (3.1.10)$$

zu erzeugen, wobei  $h$  und  $b$  den Spanquerschnitt charakterisieren,  $c$  die spezifische Wärmekapazität des Werkstoffs und  $\rho$  dessen Dichte.

Korrigiert man nun Gleichung (3.1.10) mit dem Kühlfähigkeitsindex  $K$ , gelangt man zu einer groben Schätzung der zu erwartenden Spantemperatur unter Nassbearbeitungsbedingungen:

$$\vartheta_{Ch,max} = \vartheta_0 + \frac{(1-K) \cdot \dot{Q}_{Ch}}{\rho_{Ch} \cdot c_{Ch} \cdot v_c \cdot h \cdot b} \quad (3.1.11)$$

Die Temperaturänderung in einem (trockenen) Schneidensegment der Masse  $m_{Ct}$  kann angenähert werden durch:

$$\dot{\vartheta}_{Ct} \cdot m_{Ct} \cdot c_{Ct} = \dot{Q}_{Ct,in} - \dot{Q}_{Ct,out} = \Delta \dot{Q}_{Ct} \quad (3.1.12)$$

Der dissipierte Wärmestrom  $\dot{Q}_{Ct,out}$  aus der Werkzeugschneide heraus hängt sowohl von den Wärmeleitungsbedingungen von der Schneide über den Werkzeugschaft und den Werkzeughalter in die Maschinenstruktur hinein ab

als auch von der abgegebenen Wärmestrahlung und der stoffgebundenen Konvektion in der Wärmesenke des benetzenden KSS.

Eine allgemeine Wärmeleitungsgleichung hierfür lautet:

$$\dot{Q}_{Ct,out} = \alpha_W \cdot A_W \cdot (\vartheta_{Ct} - \vartheta_{env.}) = C_W \cdot (\vartheta_{Ct} - \vartheta_{env.}) \quad (3.1.13)$$

Die Konstante  $C_W = \alpha_W \cdot A_W$  beschreibt das Wärmeübertragungsverhalten. Sie muss experimentell identifiziert werden.

Zur Vereinfachung kann auch hier angenommen werden, dass alle diese Effekte im Kühlfähigkeitsindex  $K$  enthalten sind, welcher bereits experimentell bestimmt wurde:

$$\dot{Q}_{Ct,out} = K \cdot \dot{Q}_{Ct,in} \quad (3.1.14)$$

Die Temperatur  $\vartheta(t)$  eines Elements der Werkzeugschneide mit Masse  $m$  ist dann:

$$\vartheta_{Ct}(t) = \left( \vartheta_{Ct}(t=0) - \vartheta_{env.} - \frac{(1-K) \cdot \dot{Q}_{Ct,in}}{C_W} \right) \cdot e^{\frac{-C_W \cdot t}{m_{Ct} \cdot c_{Ct}}} + \vartheta_{env.} + \frac{(1-K) \cdot \dot{Q}_{Ct,in}}{C_W} \quad (3.1.15)$$

Tribologische Aspekte und der Werkzeugverschleiß werden in einem weiteren Modellmodul behandelt. Die Beurteilung des Verschleißes an der Schneide erfordert vom Programmmodul nicht nur die Sammlung statistischer Daten wie kumulierter Schnittweg und kumulierter Vorschubweg (diese Funktionalitäten wurden im Modell durch Datapolling und ständige Aktualisierung der Werkzeug-Stammdatenbank realisiert). Sie muss auch den eigentlichen Verschleißfortschritt  $dW/dt$  verfolgen. Dazu wird die Formulierung nach Usui [USU78] (Gl. 3.1.16) benutzt.

$$\frac{dW}{dt} = A \cdot \sigma_N \cdot v_R \cdot e^{\left(\frac{-B}{\vartheta_{WZ}}\right)} \quad (3.1.16)$$

Die benötigte gemittelte Normalspannung  $\sigma_N$  auf der Spanfläche kann mit Kenntnis der Schnittkraft und der Spangeometrie angenähert werden zu:

$$\sigma_N = \frac{F_{cN} - F_{cm} \cdot \mu}{VB_{ref} \cdot (a_p - \mu \cdot a_p)} \quad (3.1.17)$$

wobei  $F_{cN} \approx F_t$ ;  $F_{cm} \approx F_c$ ,  $\mu$ : Reibungskoeffizient; und  $VB_{ref} = 0,1 \text{ mm}$  als Berechnungsreferenz für ein moderat verschlissenes Werkzeug dient (vgl. hierzu auch [MAT08]).

Die aktuelle Verschleißmarkenbreite  $VB_m(t)$  im aktuellen Zeitschritt ergibt sich dann zu:

$$VB_m(t) = VB_m(t - \Delta t) + A \cdot \sigma_N \cdot v_c \cdot e^{\left(\frac{-B}{\vartheta_{WZ}}\right)} \cdot \Delta t \cdot K_{vc} \cdot K_{BS} \quad (3.1.18)$$

mit  $K_{vc}$ : Korrekturfaktor für den Schnittgeschwindigkeitseinfluss und  $K_{BS}$  als Korrekturbeiwert für eine etwaige Werkzeugbeschichtung.

Der verschleißabhängige Korrekturfaktor  $K_{WV}$  in der Schnittkraftberechnung (Gl. 3.1.1) wird entsprechend der fortschreitenden Verschleißmarkenbreite gesetzt.

Bild 3-9 zeigt die grafische Benutzeroberfläche der ECOMATION Offline-Simulationsumgebung, welche die Prozessmodelle einbindet und es ermöglicht, Maschinenmodelle in verschiedenen Detaillierungsgraden zu laden. Zudem ermöglicht es der implementierte NC-Interpreter, sämtliche Maschinenfunktionen quasi in Echtzeit anzusteuern und über Vorschub- und Spindeldrehzahl-Override Einfluss auf Bahngeschwindigkeit und Drehzahl zu

nehmen. Hier greifen auch die Prozessoptimierer ein, indem sie den gesetzten Wert nochmals innerhalb vorgegebener Grenzen skalieren.

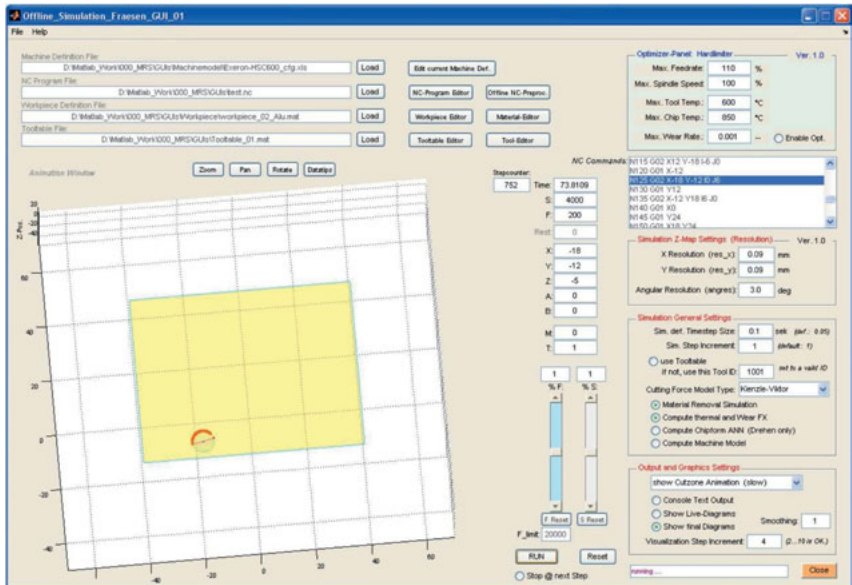


Bild 3-9: Grafische Benutzeroberfläche der Offline-Simulationsumgebung

Bild 3-10 zeigt exemplarisch die Achskräfte und das Spindelmoment bei einer Taschenbearbeitung in Aluminium.

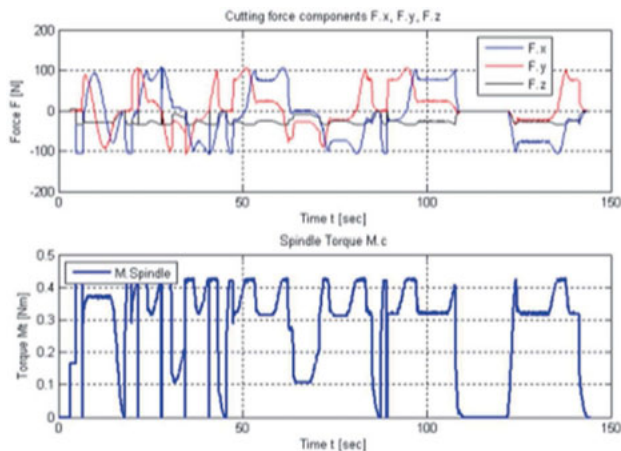


Bild 3-10: Ausgabe der simulierten Achskräfte und Spindelmoment

### Abgleich von Simulationsmodell und Messung für das Fräsen

Eine Gegenüberstellung von gemessenen und mit dem abgeglichenen Zerspanmodell simulierten Größen zeigt Bild 3-12.

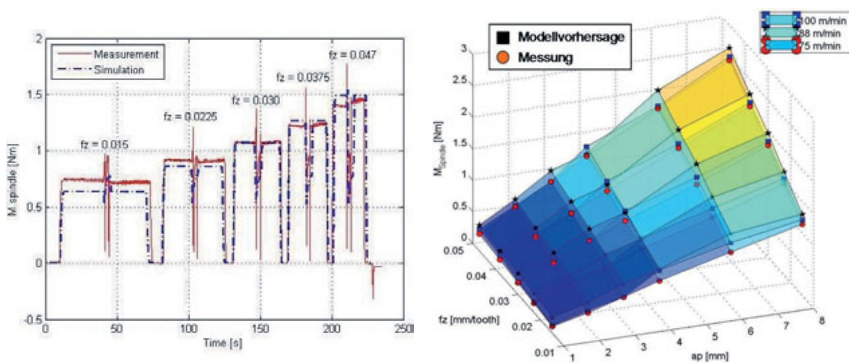


Bild 3-11: Vergleich simulierter und gemessener Werte, links: Hauptspindeldrehmomente während einer Bearbeitungssequenz, rechts in Abhängigkeit von Schnitttiefe und Vorschub

Die Übereinstimmung zwischen Modell und Messergebnissen ist nicht perfekt, aber akzeptabel (etwa 15% Abweichungen sind bei Einsetzen von verallgemeinerten Werten für die Schnittkraftkoeffizienten auch in der Literatur bekannt). Insbesondere bei höheren Schnittgeschwindigkeiten kommt es zu einer Abweichung infolge Nichtlinearitäten bei hohen Vorschüben und Schnitttiefen. Durch schnittgeschwindigkeitsabhängige Korrekturterme ließe sich der Fehler gegenüber den konkreten Ergebnissen der Zerspanversuche minimieren. Ob der Aufwand im Hinblick auf die Gesamtergebnisse der Energieverbrauchsmodellierung gerechtfertigt ist, erscheint fraglich, da insbesondere bei Maschinen mit hohem Grundlastanteil die Fehler in der Zerspankraftvorhersage zunehmend in den Hintergrund rücken.

Die virtuelle Komplettsimulation der Referenz-Fräsbearbeitung (siehe Kapitel 2.1.4) mit dem ECOMATION-Offlinesystem ergab eine gute Übereinstimmung mit der real gemessenen Leistungsaufnahme der Maschine (siehe Bild 3-12). Der sehr kurze Hochlauf der Hauptspindel zu Beginn wird mit einer 20%-igen Abweichung bei Einsatz des einfachen, kennfeldbasierten Spindelkomponentenmodells akzeptabel erfasst (Pfeil in Bild 3-12), die Bearbeitung in fünf sukzessiv zunehmenden Schnitttiefen wird hingegen sehr gut abgebildet. Der Gesamtverbrauch an elektrischer Energie ist auf der rechten Ordinatenachse aufgetragen. Der Anteil des Grundlastverbrauchs (Anteil 1) beträgt bereits 62% des Gesamtverbrauchs. Es addieren sich weitere Anteile aus den Peripherieaggregaten (Kühlung und Hydraulik, 2), den Achsantrieben (3) und der Hauptspindel (4). Anhand solcher Simulationsläufe kann nun Optimierungspotential erarbeitet werden. Die eingesetzten Modelle dürfen mit diesen Ergebnissen als verifiziert und für die Anwendung validiert gelten.

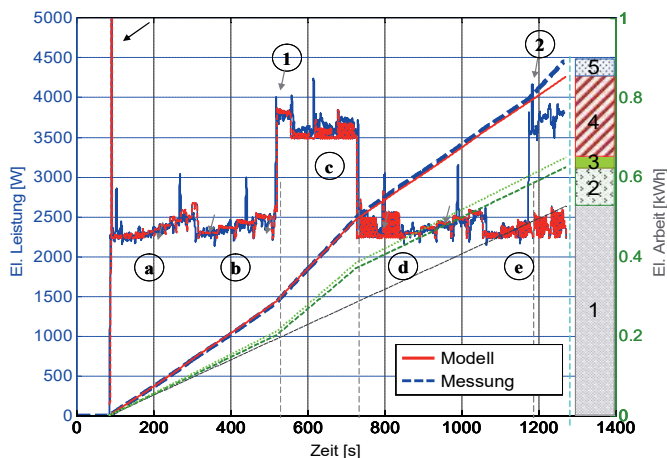


Bild 3-12: Simulierte und gemessene Leistungsaufnahme und Energieverbrauch beim Fräsen von AlMgSi-1 mit sukzessiv zunehmender Schnitttiefe

### 3.2 Verbrauchsmodellierung der Komponenten

*P. Schraml, E. Abele*

Für die simulative Abschätzung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen haben sich im Wesentlichen zwei Ansätze als besonders praktikabel erwiesen. Unterdessen der erste Ansatz den Energiebedarf von Werkzeugmaschinen mit aus Messdaten abgeleiteten empirischen Modellen versucht vorherzusagen [DIE08c], [LAR12], [WEI10], [MEC12], fokussiert sich der zweite Ansatz auf die kontinuierliche Simulation des physikalischen Verhaltens aller energiebedarfsrelevanter Komponenten [ABE12a], [ABE12b], [BIT13], [QUR12], [NEU11], [KUH11]. Während empirische Modelle den Nachteil mit sich bringen, dass für die energetische Abbildung eines komplexen Systems eine Vielzahl von Messdaten vorliegen müssen, kann das energetische Verhalten von Werkzeugmaschinen mittels mathematischer



Modelle auch ohne Leistungsmessungen auf Komponentenebene bestimmt werden. Dies ist jedoch mit einem größeren Modellierungsaufwand verbunden. Auf Grund der beschriebenen Flexibilität physisch-mathematischer Modelle, wurden diese auch für die Modellbildung in ECOMATION genutzt [EBE14] [ABE15].

Innerhalb der Forschergruppe wurden zwei Ziele, unter Zuhilfenahme von Simulationsmodellen, verfolgt. Zum einen sollte die Leistungsaufnahme von Werkzeugmaschinen in Echtzeit, ohne den Rückgriff auf externe Sensorik, überwacht werden. Zum anderen sollte allgemein der Energiebedarf für die Zerspanung eines dezidierten Werkstückes auf einer bestimmten Werkzeugmaschine prognostiziert werden. Die resultierenden Anforderungen an die Simulationsmodelle für beide Anwendungen unterscheiden sich entsprechend deutlich.

### 3.2.1 Dynamische Modelle

Die zwei wichtigsten Anforderungen an die Simulationsmodelle waren einerseits eine möglichst große Präzision in der Abbildung des energetischen Verhaltens, andererseits die Möglichkeit die Modelle unabhängig von einer Simulationsumgebung ausführen zu können. Da diese Zielkriterien nur schwierig gleichzeitig gelöst werden konnten, wurde das Vorgehen gewählt, zunächst Matlab/Simulink Modelle aller energieverbrauchsrelevanten Maschinenkomponenten zu erstellen, welche das zu betrachtende System möglichst genau abbilden. Eine Nebenanforderung war dabei den Parametrierungsaufwand der Modelle möglichst gering zu halten. So wurden die Modelle entsprechend ausgelegt, dass alle relevanten Daten den Datenblättern der entsprechenden Komponentenhersteller zu entnehmen sind.

Um der Anforderung der simulationsumgebungsunabhängigen Lauffähigkeit gerecht zu werden, wurde eine Methode gewählt, die es erlaubt die in der Simulationsumgebung von Matlab entwickelten Modelle derart zu kompilieren, dass diese ohne Matlab selbst ausgeführt werden können. Gleichzeitig sollte eine massive Verkürzung der Rechenzeit für eine echtzeitfähige Simulation erreicht werden. Hierfür wurden die Komponentenmodelle in auf C++ basierenden Matlab S-Function-Modelle übertragen. Die detaillierten Komponentenmodelle berücksichtigen auch die Einschwingvorgänge in den jeweiligen Systemen. Mittels des in Matlab integrierten „Simulink Coder“ ergab sich schließlich die Möglichkeit, die Modelle in eigenständige .dll (dynamische Bibliothek) Dateien zu kompilieren und diese aus einer beliebigen C++ Konsolenanwendung aufzurufen.

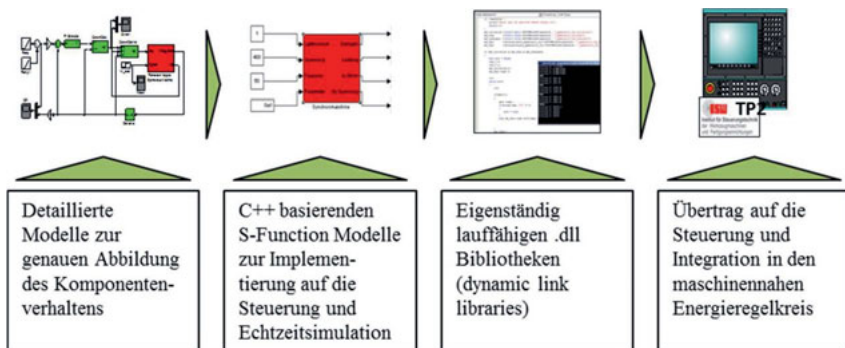


Bild 3-13: Vorgehen zur Einbindung von Simulationsmodellen auf Maschinensteuerung

Da die Simulationsumgebung von Matlab bei der Kompilierung sehr empfindlich auf algebraische Schleifen in den Modellen reagiert, war es notwendig die Modelle entsprechend anzupassen, so dass eine Kompilierung erst

möglich wurde. Bild 3-13 zeigt die entwickelte Vorgehensweise zur Einbindung der Komponentenmodelle auf der Maschinensteuerung schematisch auf.

### 3.2.2 Synchron-Hauptspindelantriebe

Die Motorparameter, wie Induktivität, Widerstand und Rotorflusskonstante der permanentmagnetenerregten Synchronmaschine (PMSM) sind nicht konstant, sondern variieren z. B. mit dem Stromarbeitspunkt oder der Temperatur. Herkömmliche Regelungssysteme in Frequenzumrichtern berücksichtigen dies nicht, weshalb die Aufteilung von feldschwächendem und momentbildendem Strom nicht optimal ist und des Weiteren der Spannungsstellbereich des Frequenzumrichters nicht voll ausgenutzt wird. Zur Bestimmung der optimalen Werte für den feldschwächenden und drehmomentbildenden Strom wird zwischen zwei Konzepten unterschieden. Zum einen können offline berechnete Werte in Tabellen abgelegt werden, die jeweils in Abhängigkeit vom Soll Drehmoment und der aktuellen Drehzahl ausgelesen und an die Stromregler übergeben werden [MOR90], [MIN09]. Im anderen Fall kommt ein sogenannter Spannungsregler zum Einsatz [KIM97]. Die aktuelle Ausgangsspannung des Frequenzumrichters wird bestimmt und sobald die maximale Spannung überschritten wird, sorgt der Spannungsregler dafür, dass ein feldschwächender Sollstrom vorgegeben wird. Durch das Einprägen dieses Stroms sinkt die Gesamtspannung ab und die Drehzahl kann weiter erhöht werden. Beide Konzepte weisen bestimmte Nachteile auf. Beim ersten Konzept können keine veränderlichen Motorparameter berücksichtigt werden, da die in den Tabellen abgelegten Werte statisch sind. Beim zweiten Konzept erfolgt die Berücksichtigung von veränderlichen Motorparametern

zwar automatisch durch den Integralanteil des Spannungsreglers. Aus Stabilitätsgründen muss die Bandbreite des Spannungsreglers aber kleiner als die des Stromreglers gewählt werden, wodurch die Dynamik dieses Regelsystems leidet. Die für die Regelung der Synchronmaschine notwendigen Parameter dürfen nicht als konstant betrachtet werden. Ankerwiderstand und Rotorflusskonstante weisen beispielsweise eine Temperaturabhängigkeit auf. Die Induktivitäten in d- und q-Richtung variieren sehr stark mit dem eingestellten Stromarbeitspunkt. Die Einstellung der Regelung muss deshalb entweder robust, d. h. eher konservativ, erfolgen oder, was hinsichtlich der erreichbaren Dynamik vorteilhafter ist, adaptiert werden. Die Besonderheit des entwickelten neuartigen Regelsystems ist das echtzeitfähige Vorsteuerkonzept. Dieses berechnet aus dem aktuellen Drehmomentsollwert und der aktuellen Drehzahl in Echtzeit die Sollwerte für den feldschwächenden und drehmomentbildenden Strom. Somit können veränderliche Motorparameter bei der Sollwertberechnung berücksichtigt werden. Aufgrund der dann vorliegenden exakten Motorgrößen kann der Spannungsbereich des Frequenzumrichters voll ausgenutzt werden und der Motor wird stets an seinem optimalen Arbeitspunkt betrieben [ABE11].

#### 3.2.3 Asynchron-Hauptspindelantriebe

Basis des Simulationsmodells bildet das mathematische Modell einer Asynchronmaschine, wie es u.a. von [SCH09] [EIS11] [ABE12a] beschrieben ist, erweitert mit einer feldorientierten Regelung mit Rotorflussorientierung. Der Vorteil der feldorientierten Regelung mit Rotorflussorientierung ist die unabhängige Regelbarkeit von Rotorfluss und Drehmoment. Dies ermöglicht es u.a. den Motor stets im aktuellen Drehmomentoptimum zu betreiben, wodurch sie sich in Kombination mit einem Asynchronmotor besonders als

Antrieb für energieeffiziente Lösungen eignet. Allgemein problematisch bei der feldorientierten Regelung ist die Notwendigkeit der genauen Kenntnis von momentaner Lage und Amplitude des Rotorflusses. Neben kostspieliger Sensorik zur Erfassung der benötigten Größen gibt es verschiedene Modelle die eine Abschätzung ermöglichen. Im beschriebenen Simulationsmodell wird das sogenannte I<sub>1</sub> β<sub>L</sub>-Modell verwendet, welches sich besonders durch einen geringen Schätzfehler auszeichnet [SCH15b].

Neben dem Istwert des Rotorflusses wird für die Regelung der momentoptimale Fluss für die jeweils aktuelle Drehzahl benötigt. Für den Ankerstellbereich wird dieser über die Drehzahl als konstant angenommen und lässt sich über den maximalen Strom und die Hauptinduktivität des Motors bestimmen. Im Feldschwächebereich ergibt sich der drehmomentoptimale Rotorfluss aus dem Schnittpunkt von Motormomentenverlauf über Rotorfluss für eine dezidierte Drehzahl und dem Motormomentenverlauf über Rotorfluss bei maximal möglichen Strom (vgl. Bild 3-14) [SCH15b], [ABE12a].

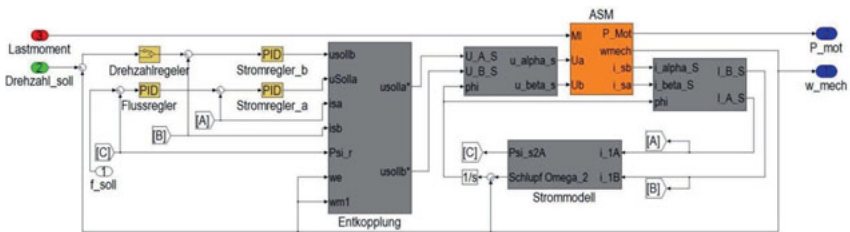


Bild 3-14: Blockschaltbild einer Asynchronspindel

### 3.2.4 KSS-Hochdruck und KSS-Niederdruck Systeme

Das entwickelte Modell basiert auf Kennfeldern der zu simulierenden Pumpen, welche aus dem Herstellerdatenblatt der entsprechenden Pumpe entnommen werden kann. Durch die Interpolation dieser, kann so das Verhalten

unter verschiedenen Randbedingungen nachgebildet werden. Durch die Nutzung von Ähnlichkeitsbeziehungen (nur bei Strömungsmaschinen) ist es möglich, das für nur eine Drehzahl angegebene Kennfeld, auf beliebige Pumpendrehzahlen zu übertragen. Die simulative Abbildung verschiedener Düsen und Ventile kann auf die gleiche Art erfolgen (vgl. Bild 3-15). Sind keine Kennfelddaten im Datenblatt hinterlegt, ist es möglich über Öffnungsquerschnitte und entsprechender Drosselgleichungen das Verhalten von Düsen und Ventile abzubilden.

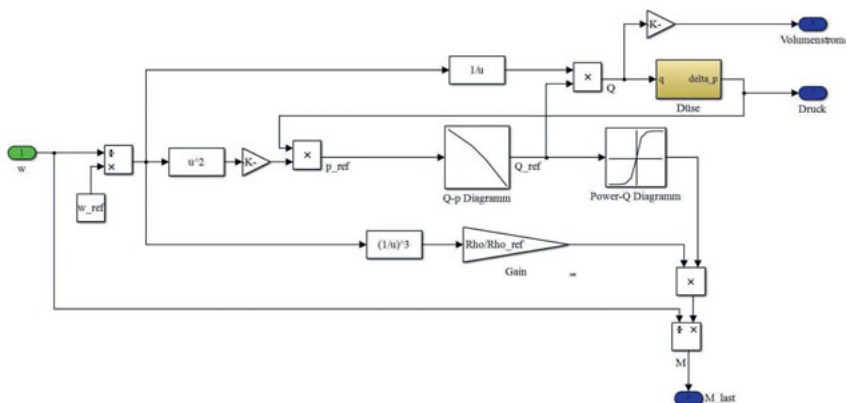


Bild 3-15: Blockschaltbild eines einfachen KSS-Systems

Es zeigte sich z.B. dass für eine energetische Abbildung des Systems die Betrachtung der Ventile und Düsen besonders wichtig ist, die Leitungen jedoch vernachlässigt werden können.

Es wurde Wert darauf gelegt, den Aufwand zur Parametrierung der Modelle in angemessenem Verhältnis zu deren Genauigkeit zu halten. Die Nachbildung des Betriebsverhaltens der wichtigsten Komponenten wie Motoren,

Pumpen oder Ventile konnte durch Verwendung der in den Komponenten-datenblättern enthalten Größen gewährleistet werden [VER11a].

### 3.2.5 Hydrauliksysteme

Nach der Ermittlung typischer Komponenten eines Hydrauliksystems einer Werkzeugmaschine wie Hydropumpen, Druckbegrenzungsventile, Hydrozylinder, Wegeventile, Druckflüssigkeitsspeicher und Filter, wurden diese, einzeln in Matlab-Simulink modelliert.

Als zentrale Einheit eines hydraulischen Systems wandelt die Hydropumpe die zugeführte rotatorische mechanische Leistung, welche innerhalb von Werkzeugmaschinen meist von Asynchronmotoren zur Verfügung gestellt wird, in hydraulische Leistung um. Generell existieren hierfür zwei Prinzipien. Kreiselpumpen, auch hydrodynamische Pumpen genannt, führen der Druckflüssigkeit Energie in Form von kinetischer Energie zu, während Verdrängerpumpen, auch hydrostatische Pumpen genannt, hauptsächlich Druckenergie dem System bereitstellen [BAU08].

Identisch zum Vorgehen bei der Modellierung von KSS-Systemen, wurden wieder Kennliniendaten aus den entsprechenden Pumpendatenblättern genutzt, um Volumenströme und benötigte Antriebsleistungen in Abhängigkeit des anliegenden Druckes und der vom Motor zur Verfügung gestellten Drehzahl zu bestimmen (vgl. Bild 3-16).

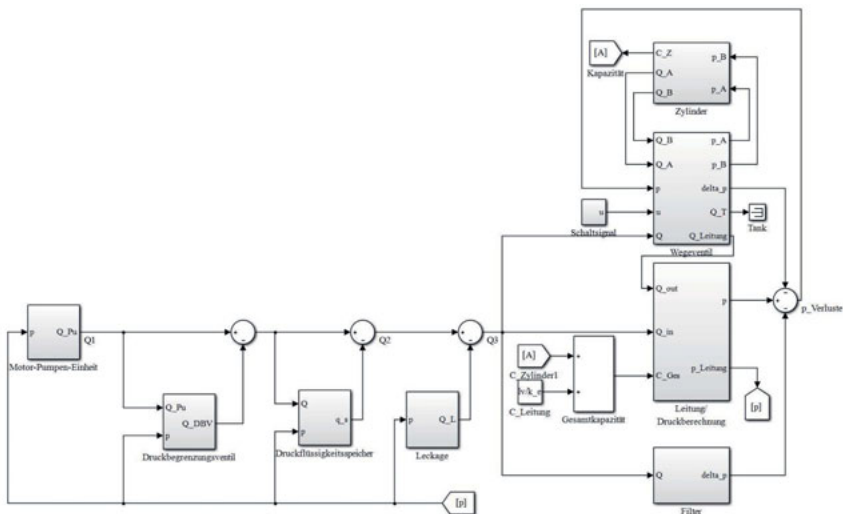


Bild 3-16: Hydrauliksystem mit Druckregelung über Druckbegrenzungsventil

Problematisch bei der Nutzung von Kennlinien ist, dass diese nur Daten für die Nenndrehzahl bei einer bestimmten Druckflüssigkeitsviskosität angeben. Da der Gesamtwirkungsgrad der Hydropumpe und der damit verbundene effektive Volumenstrom allerdings zusätzlich von diesen beiden Faktoren abhängt, mussten weitere Überlegungen in das Modell mit einfließen: Beim Anfahren der Pumpe bzw. des Motors werden von 0 bis zur Nenndrehzahl alle dazwischen liegenden Werte durchlaufen. Dabei wird die Beschleunigung des Motors als konstant angenommen. Legt man den generellen Verlauf des Pumpengesamtwirkungsgrades in Abhängigkeit der Drehzahl zu Grunde, so kann ein Energiebedarf des Anfahrvorganges approximiert werden. Der Fehler hierbei ist gering zu bewerten, da die Zeit des Anfahrvorganges im Vergleich zur Gesamtsimulationsdauer sehr kurz ist und somit etwaige Fehler kaum ins Gewicht fallen.



### 3.2.6 Rückkühlsysteme

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden unterschiedliche Rückkühlkonzepte modelliert. Dazu zählen die Heißgas-Bypass-Regelung, der im Abschaltbetrieb betriebene Kompressoren, sowie Drehzahlgeregelte Kompressoren. Herzstück aller Systeme ist die thermische Masse des Flüssigkeitsspeichers der Rückkühlaggregate, auf welche bspw. Teile der thermischen Verluste der angebundenen Komponenten als auch Umgebungsbedingungen einwirken (vgl. Bild 3-17). Für die Ermittlung der thermischen Verlustleistung von Achs- & Spindelantrieben wurden mehrere Messungen an einem Bearbeitungszentrum durchgeführt. So zeigte sich, dass die Abbildung der thermischen Antriebsverluste als Anteil der elektrischen Verluste mit zeitlicher Verzögerung, hinreichend genau ist. Darüber hinaus haben Messungen an drei unterschiedlichen Bearbeitungszentren ähnlicher Leistungsklassen ergeben, dass die in das Kühlwasser abgeführte Wärmeleistung des Schaltschranks, weitestgehend konstant und somit unabhängig vom Bearbeitungsprozess ist. Entsprechend wurde die thermische Verlustleistung von Schaltschränken als Konstante modelliert.

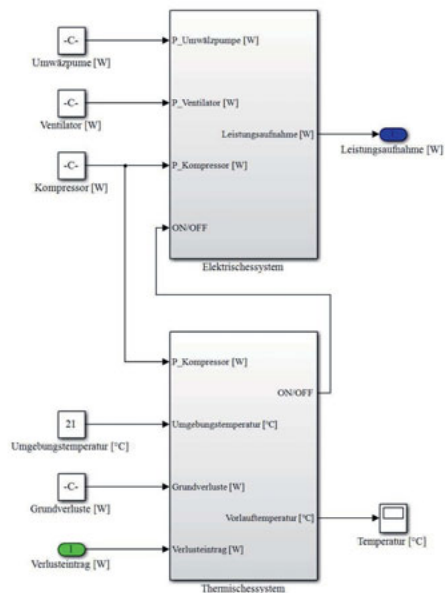


Bild 3-17: Blockschaltbild eines Rückkühlsystems mit Hystereseschaltung

### 3.2.7 Statische Modelle

Es hat sich gezeigt, dass komplexe Simulationsmodelle zur Bestimmung der Leistungsaufnahme einzelner Funktionsmodule einer Werkzeugmaschine durch den hohen benötigten Rechenaufwand in ihrer Anwendbarkeit beschränkt waren. Insbesondere Beschleunigungsvorgänge und Lastsprünge bei drehzahlgeregelten Antrieben verzögerten das Monitoringsystem derart, dass keine zuverlässige Aussage über die momentane elektrische Leistungsaufnahme mehr möglich war. Daraus hat sich die Notwendigkeit ergeben „schlankere“ Modelle zu entwickeln. Da vereinfachte Modellannahmen

meist mit Verlusten in der Ergebnishüte einhergehen, wurden die vorhandenen, dynamischen Simulationsmodelle genutzt, um Kennfelder für die Leistungsaufnahme einzelner Komponenten zu erzeugen. Der große Vorteil von Kennfeldern liegt in der einfachen Handhabung und Nutzung durch Programme außerhalb der Simulationsumgebung, als auch in der Möglichkeit Leistungswerte direkt auszulesen, was einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber der entsprechenden Berechnung durch das zugrunde liegende Simulationsmodell birgt [ABE12a]. Das entsprechend gewählte Vorgehen ist Bild 3-18 zu entnehmen.

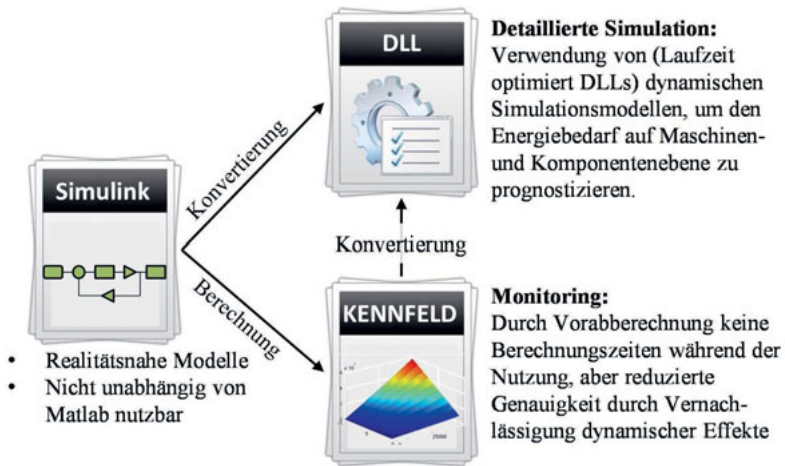


Bild 3-18: Entwickeltes Vorgehen

### 3.3 Betriebszustandsbasierte Verbrauchsmodellierung

*Ph. Eberspächer, A. Verl*

Eine Werkzeugmaschine kann verschiedene Betriebszustände annehmen. Zu diesen gehört neben der Betriebsbereitschaft der eigentliche Fertigungsprozess oder auch der Not-Aus-Zustand. Nach [DIE08a] und [LI11] sind der typischen Leistungsaufnahme von Werkzeugmaschinen verschiedene, annähernd konstante Leistungsniveaus für die jeweiligen Betriebszustände zu entnehmen. Zur Abbildung dieser Leistungsaufnahme wird im Folgenden ein zustandsbasierter Ansatz angewandt. Neben den eigentlichen Zuständen sind auch die Übergänge zwischen den Betriebszuständen abzubilden. In der Basisausführung des Energieverbrauchsmodells umfasst es also zum einen die den jeweiligen Zuständen zugeordneten Maschinenkomponenten und ihre analysierte und gemittelte Leistungsaufnahme (siehe Bild 3-19 links) und zum anderen die möglichen Betriebszustände und ihre Übergänge (siehe Bild 3-19 rechts).

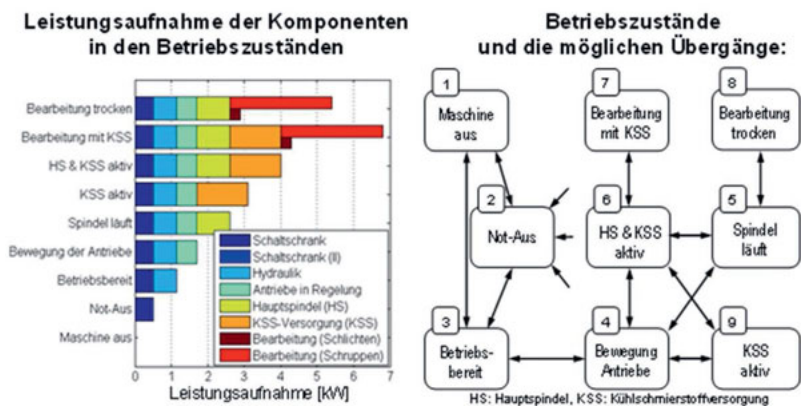


Bild 3-19: Exemplarisches zustandsbasiertes Energieverbrauchsmodell nach [DIE08b]

Das in Bild 3-19 exemplarisch dargestellte, zustandsbasierte Energieverbrauchsmodell ist nur als Beispiel zu sehen. Der Detailgrad des Modells kann durch das Hinzufügen oder Entfernen von Zuständen variiert werden. Im einfachsten Fall wäre ein Modell mit nur den folgenden vier Zuständen denkbar:

- Maschine aus
- Not-Aus
- Im Betrieb
- Prozess

Für einen erhöhten Detailgrad wären jedoch auch mehr als die neun dargestellten Zustände möglich. Dieser kann zum Beispiel durch das Abbilden von Nass- und Trockenbearbeitung, Schlicht- und Schruppprozessen oder das Hinzufügen von Energiesparmodi mit unterschiedlicher Ausprägung erhöht werden. Das um die genannten Zustände erweiterte Zustandsmodell ist in Bild 3-20 dargestellt. Um den Detailgrad weiter zu erhöhen, können Zeitverläufe oder Beschränkungen zu den Übergängen zwischen den Zuständen angegeben werden. Nach dem Einschalten der Maschine, also beim Übergang vom Zustand Maschine aus zum Zustand Betriebsbereit sind bspw. teilweise Verschmierzyklen oder Warmlaufzyklen notwendig. Außerdem kühlt die Maschine durch langes Verweilen im Not-Aus ggf. ab, sodass zum Erreichen einer Betriebsbereitschaft zunächst ein erneuter Warmlauf notwendig wird. Diese Eigenschaften der Zustandsübergänge müssen dann bei der Modellierung berücksichtigt werden.

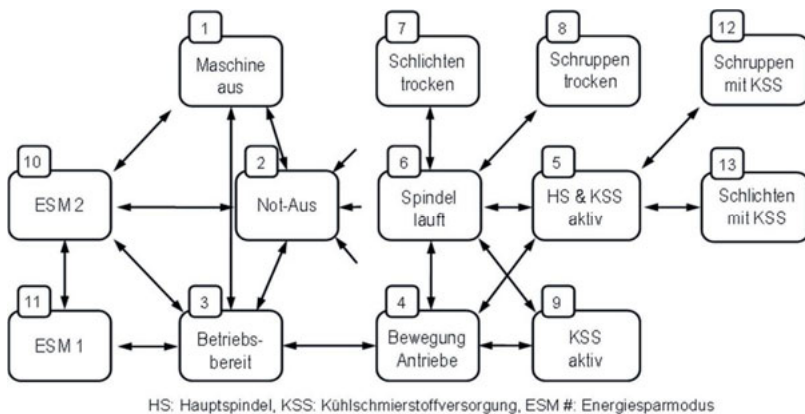


Bild 3-20: Mögliche Erweiterung des zustandsbasierten Energieverbrauchsmodells

Die elektrische Leistungsaufnahme und damit der kumulierte Energieverbrauch kann mit dem Zustandsmodell aus Bild 3-20 bereits gut vorhergesagt werden (siehe Bild 3-21). Als Modelleingang wird hier eine Zustandsfolge über der Zeit eingesetzt. In diesem Beispiel werden diverse Betriebszustände nacheinander eingenommen. Das Modell folgt den gemessenen Leistungsniveaus; es ist jedoch im rechten Teil der Abbildung bei der Analyse des kumulierten Energieverbrauchs der Modellfehler zu erkennen. Durch die im nächsten Abschnitt erläuterte erweiterte Modellstruktur wird dieser Fehler, der durch die nicht konstante Leistungsaufnahme der Komponenten und des Fertigungsprozess auftritt, behoben. Durch eine kontinuierliche Veränderung und Anpassung der Zustandsfolge kann modellbasiert die optimale Zustandsfolge für den geplanten Fertigungsprozess ermittelt werden. Dieser kann wiederum durch die Maschinensteuerung umgesetzt und somit eine erste Optimierung bzw. Reduktion des Energieverbrauchs vorgenommen werden.

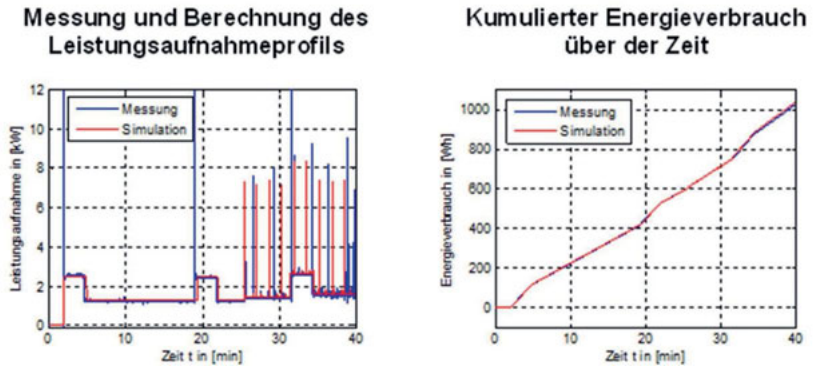


Bild 3-21: Anwendung des zustandsbasierten Energieverbrauchsmodells [EBE11]

Um die genannten Fehler zu beheben wird ein hybrider Ansatz für die Modellstruktur angestrebt (siehe Bild 3-22). Im Grundmodell umfasst dieser das bereits beschriebene zustandsbasierte Modell mit dem gemittelten, konstanten Verbrauch jeder Komponente im jeweiligen Betriebszustand.

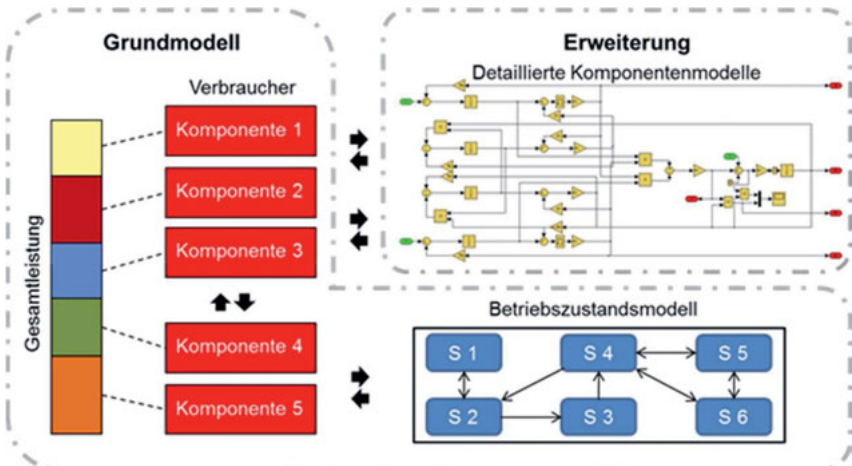


Bild 3-22: Modellstruktur zum Einsatz bei der Energieverbrauchsvorhersage

Die Erweiterung erfolgt durch die Integration der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen parameterabhängigen Komponentenmodelle.

### 3.4 Verbrauchsmodellierung der Produktion mit Peripherie

*S. Wahren, E. Colangelo, Th. Bauernhansl*

Um eine Fabrik energetisch modellieren und bewerten zu können, ist es erforderlich, das Simulationssystem in einem ersten Schritt um energetische Größen zu erweitern. Hierzu werden die Zustände der Ressourcenmodelle mit Energieprofilen verknüpft. Es handelt sich also um eine statusbasierte energetische Modellierung. Der Vorteil in diesem Ansatz liegt darin, dass jedem verfügbaren Maschinenstatus eine charakteristische Leistungsaufnahme zugeordnet werden kann. Durch die Bildung des Integrals über die Zeit, in welcher der Zustand anliegt, kann der Energieverbrauch errechnet werden. Es werden mehrere verschiedene Standardzustände unterschieden, welche die Ressourcen der Hauptprozesse einnehmen können.

Tabelle 3-1: Übersicht zu den möglichen Ressourcenstatus

Status	Erklärung
Arbeitend	In diesem Zustand arbeitet die Ressource. Der Zustand bleibt bis zum Ende der Bearbeitungszeit erhalten
Warmlauf	In diesem Zustand erreicht die Maschine die erforderliche Betriebstemperatur
Wartend	In diesem Zustand ist die Ressource bereit für die Bearbeitung und wartet auf ein zu bearbeitendes Werkstück. Die Ursache für diesen Zustand kann z.B. eine Störung oder eine höhere Taktzeit an der vorgelagerten Ressource sein.
Blockiert	In diesen Zustand kann die Ressource nicht produzieren, da kein Werkstückabtransport stattfindet. Das ist z.B. der Fall, wenn die nachfolgende Ressource gestört oder blockiert ist.
Gestört	In diesem Zustand ist die Ressource Ursache des Problems. Störzeiten können z.B. Werkzeugbrücke, Verklemmungen oder Sensorprobleme sein.



Einrichten	In den oben genannten Zuständen hat die Ressource einen unterschiedlichen Energieverbrauch: Es ist z.B. naheliegend, dass der Energieverbrauch eines Bearbeitungszentrums im Zustand „Arbeitsend“ höher als im Zustand „Pausierend“ ist, da die Hauptschneidspindel nur laufen, wenn auch zerspannt wird.
Energiesparen	Neu definiert, Vorgabe für diesen Status kommt vom Leitsystem oder der Steuerung (vgl. AP 3.3.1 und 3.3.2)

Der erarbeitete Ansatz ermöglicht es, den Energieverbrauch in Abhängigkeit vom jeweiligen Status der Ressourcen zu modellieren.

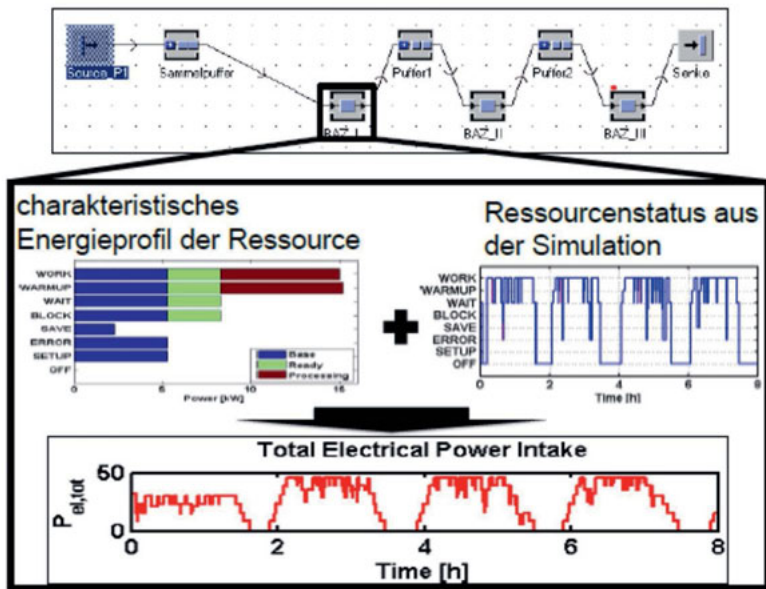


Bild 3-23: Verknüpfung von Status und Energieverbrauch

Anhand der Analyse der definierten Standardzustände wird – wie in Bild 3-23 dargestellt – ein zusätzlicher Energiesparmodus eingeführt, bei dem von einer übergeordneten Instanz ab einer bestimmten, vorher definierten

Zeitspanne die Maschinen in einen Energiesparmodus versetzt wird (vgl. Tabelle 2). Diese Zeitspanne muss vom Leitsystem vorgegeben werden.

Um das energetische Verhalten einer Fabrik modellieren zu können, sollten wie in Kapitel 2.4 dargestellt die peripheren Systeme berücksichtigt werden, da diese wesentlichen Einfluss auf das energetische Verhalten der Fabrik haben. Da ein lokales energetisches Optimum einer Ressource nicht zwangsläufig ein energetisches Optimum der Fabrik zur Folge hat, müssen die Ressourcen der Hauptprozessen und die Peripheren Systeme so koordiniert werden, dass der Energieverbrauch der gesamten Fabrik minimal wird. Hierbei lag der Fokus auf der Modellierung der peripheren Systeme Beleuchtung, Druckluftversorgung und Zentraler KSS-Versorgung. Sie wurden in Abhängigkeit ihrer peripheren Ordnung mit den Bearbeitungsmaschinen in Bezug gesetzt. Bei der Modellierung der Peripherie ist zu beachten, dass die Einflussgrößen auf das Verhalten der Peripherie variieren. Die Einflussgrößen auf die einzelnen Systeme können wie folgt beschrieben werden:

Die **Kühlschmierstoffbereitstellung und -aufbereitung** (KSS) ist direkt vom Produktionsprogramm oder von Zustand der Fertigungsressourcen abhängig. Diese Systeme können entweder eine dezentrale oder zentrale Bauart aufweisen.

Bild 3-24 zeigt die Vorgehensweise zur Modellierung der zentralen KSS dar. Hierbei wird deutlich, dass die Komponenten unterschiedliche Abhängigkeiten auf die Lastganglinien aufweisen. Sie können in drehzahlabhängige Komponenten, niveauregulierte Komponenten sowie konstante Verbraucher unterteilt werden. Aus diesem Ansatz lassen sich spezifische Leistungsniveaus für Teillastbetrieb in Abhängigkeit des benötigten Volumenstroms ableiten.

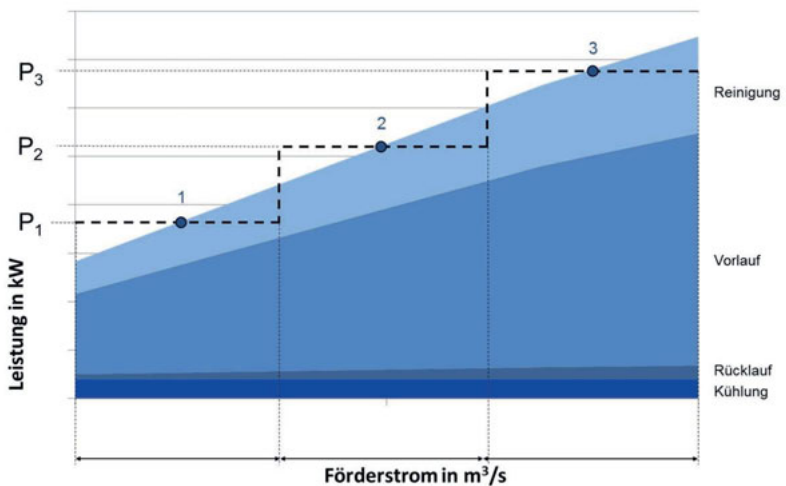
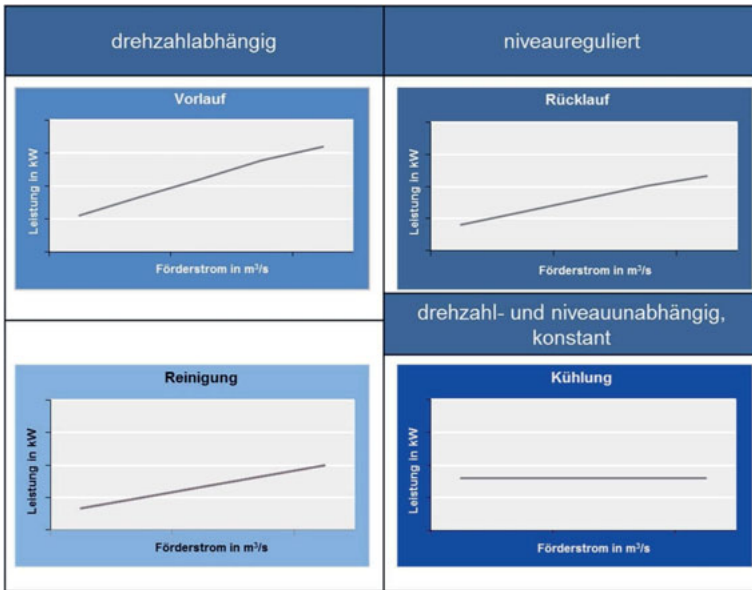


Bild 3-24: Modellierung einer zentralen KSS-Anlage [HAA13]

Das **Druckluftversorgungssystem**, welches meist zentral mehrere Maschinen versorgt, muss immer genug Druckluft im Speicher bereitstellen. Dieses Versorgungssystem ist also, wie die meisten peripheren Systeme zweiter Ordnung, vom Zustand der Fertigungsressourcen abhängig.

**Beleuchtungsanlagen** können im Allgemeinen während der Schichtzeit als konstant angenommen werden und sind damit direkt vom Schichtplan abhängig.

Der Energieverbrauch von **Heizungs-Lüftungsklima-Anlagen** (HLK) richtet sich beispielsweise nach Standort, Jahreszeiten, Tageszeiten, Schichtkalender, Abwärme der Maschinen und technologischen Parametern der Gebäudehülle: Im Sommer läuft häufig die Klimaanlage, im Winter die Heizung. Außerdem muss z.B. das Produktionsgebäude bei einem 3-Schicht-System auch nachts auf eine höhere Temperatur gebracht werden als bei einem 2-Schicht-System. Daher ist eine pauschale Aussage über die Lastganglinie der HLK Anlagen nicht möglich.

Die Modellierung und Simulation der unterschiedlichen Szenarien erfolgt im Materialfluss-Simulationssystem eM-Plant. Die Parametrierung und Visualisierung erfolgt direkt oder über eine Schnittstelle mit MS Excel.

Im Materialflusssimulationssystem ist es möglich, über Methoden die peripheren Bereiche abzubilden und mit den Hauptprozessen zu verknüpfen. Außerdem können verschiedene Schichtsysteme simuliert werden. Da der Materialfluss bei diesen Systemen im Vordergrund steht, können verschiedene Produktionslayouts modelliert und simuliert werden. Über externe Schnittstellen ist es möglich, benötigte Input-Parameter wie z.B. energetische Feld-

daten, Rüst-, Bearbeitungs- und Erholzeiten sowie den Produktmix in Datenbanken abzulegen und in das System zu übernehmen. Außerdem können über die Schnittstellen relevante Informationen wie z.B. Maschinenstatus und Zeiten aus dem Simulationsprogramm exportiert werden. Es findet also eine bidirektionale Kommunikation zwischen Datenbank und Simulationssystem statt. Diese Zusammenhänge wurden in eM-Plant modelliert. Im Projektverlauf wurden weitere Parameter aus dem Arbeitsplan in die Modelle integriert und diese so weiter detailliert.

### 3.5 Monetäre Bewertung auf Basis von Verbrauchsmodellen

*S. Wahren, E. Colangelo, Th. Bauernhansl*

Die isolierte Betrachtung und Bewertung des Energiebedarfs in der Fertigung ist nicht immer zielführend, da durch eine einseitige Ausrichtung der Produktion auf ein energetisches Minimum andere Zielgrößen negativ beeinflusst werden können. Daher erfolgten zusätzlich die Betrachtung weiterer Zielgrößen – „Qualität“, „Zeit“ und „Kosten“ – und deren Einfluss auf die Produktion. Die Ermittlung der genannten Zielgrößen, soll die eine Transparenz über alternative Produktionsszenarien unter Berücksichtigung aller Ressourcen sowie peripheren Systeme bieten.

Zur Berücksichtigung der Zeit wurden die Durchlaufzeit und die Einhaltung der Termintreue eines Auftrags herangezogen. Der Faktor der Qualität wurde mit der Kennzahl OEE berücksichtigt, welche die Verfügbarkeit, den Qualitätsgrad und den Nutzungsgrad der Ressourcen beinhaltet. Der Energieverbrauch wurde durch die Kennzahl „Energetischer Effizienzgrad“ integriert. Mit Hilfe der Zielgröße „Kosten“ sollen die Ermittlung der neuen (alternativen) Systemkonfiguration ermittelt werden.

Alternative Produktionsszenarien zeichnen sich beispielsweise durch eine andere Maschinenbelegungsplanung aus, die eine Verkürzung oder Verlängerung der Produktionszeit, die zeitliche Verschiebung der Produktion sowie die Nutzung anderer Maschinen zur Folge hat. Diese Effekte können unterschiedlich große Auswirkungen auf die Energiekosten haben. Längere Fertigungszeiten können höhere Energiekosten verursachen, abhängig vom Energieverbrauchslevel der Maschine selbst. Zum Teil kann die zeitliche Verschiebung der Produktion in Nebenzeiten auch Kostenvorteile bringen, bspw. wenn für Nebenzeiten günstige Energiebezugspreise möglich sind. Die mit einem alternativen Produktionsszenario verbundenen Kosten, sollten jedoch nicht nur die Energiekosten berücksichtigen, da eine längere Produktionszeit oder die zeitliche Verschiebung der Fertigung in Nebenzeiten zu anderen Schichtmodellen und damit anderen Personalkosten führen können. Verschiedenen Kostenarten, die durch eine andere (alternative) Maschinenbelegung beeinflusst werden, sollten bei der Bewertung der alternativen Produktionsszenarien Berücksichtigung finden. Wie bereits dargestellt zählen dazu beispielsweise die Personalkosten sowie die Energie- und Medienkosten. Weitere Auswirkungen können sich auf die Betriebsmittelkosten und die Materialkosten ergeben.

Für die weiteren Betrachtungen wurden die Möglichkeiten im Rahmen der Kostenträgerrechnung geprüft. Die Kostenträgerrechnung fokussiert auf die Betrachtung eines einzelnen Auftrags, einer Charge oder eines Produkts und betrachtet sowohl die Gemein- als auch Einzelkosten.

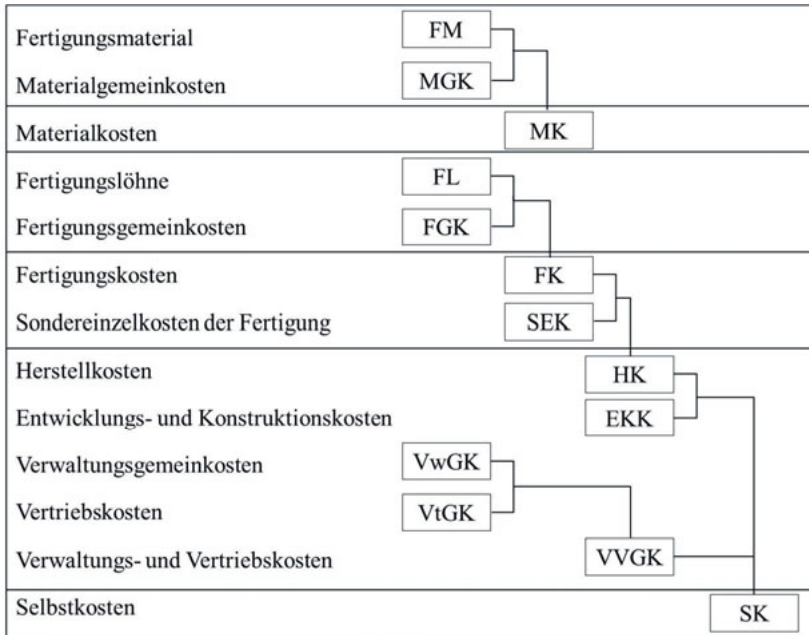


Bild 3-25: Ermittlung der Selbstkosten. Nach [WES06] S. 43

Für die Ermittlung der Kosten eines alternativen Produktionsszenarios wird unter Berücksichtigung der Kostenträgerrechnung folgender Ansatz gewählt:

$$K_{Sys} = \sum K_M + \sum K_E$$

mit  $K_{Sys}$  = Gesamtkosten der Systembelegung

$K_M$  = Materialkosten

$K_E$  = Kosten pro Stück

Eine umfassende Betrachtung der Selbstkosten, wie in Bild 3-25 dargestellt erfolgt nicht. Da die Annahme getroffen wird, dass eine Änderung der Maschinenbelegung, keine Auswirkungen auf Entwicklungs- und Konstruktionskosten oder die Verwaltungs- und Vertriebsgemeinkosten hat.

Die Fertigungskosten ( $K_E$  = Kosten pro Stück) können beispielsweise durch die Maschinenstundensatzrechnung ermittelt werden. Die Maschinenstundensatzrechnung untergliedert sich in die Ermittlung der Lohnkosten und den Maschinenstundensatz. Der Maschinenstundensatz berücksichtigt die direkt zuordnungsbareren Kosten wie: kalkulatorische Abschreibungen, kalkulatorische Zinsen, Raumkosten, Energiekosten und Instandhaltungskosten. Hierzu kann folgende Formel angewendet werden:

$$\sum K_E = T_A * L_H + T_A * K_{MH}$$

wobei  $K_{MH} = \sum \frac{K_n}{T_n}$

mit  $K_E$  = Kosten pro Stück  
 $T_A$  = Ausführungszeit pro Stück (h)  
 $L_H$  = Lohn pro Stunde (€/h)  
 $K_{MH}$  = Maschinenstundensatz  
 $K_n$  = Kosten bestehend aus kalkulatorischen Abschreibungen (K1), Kalkulatorischen Zinsen (K2), Raumkosten (K3), Energiekosten (K4), Instandhaltungskosten (K5)  
 $T_n$  = Nutzungszeit

Im Rahmen der Maschinenstundensatzrechnung erfolgt die Berücksichtigung der Energiekosten. Über den gewählten Ansatz kann eine Kostenbewertung des alternativen Produktionsszenarios erfolgen.



---

## 4 Bereitstellung von Energiebedarfsinformationen und Energiebedarfsmonitoring

Dieses Kapitel dreht sich um die Bereitstellung von Energiebedarfsinformationen und Energiebedarfsmonitoring. Unter Energiebedarfsinformationen versteht man Größen, wie z.B. eine Drehzahl und ein Drehmoment aus denen der Energiebedarf errechnet werden kann.

### 4.1 Verfügbarkeit von Energiebedarfsinformationen

*J. Friedrich, J. Schlechtendahl, Ph. Eberspächer*

Als erster Schritt zur Identifikation von Energiebedarfsinformationen wurden unterschiedliche Fräs- und Drehmaschinen hinsichtlich ihrer verbauten Komponenten untersucht. Die Gruppierung der Komponenten erfolgt dabei in verschiedene Kategorien wie „Rechnereinheiten“, „E/A“ Module, „Lüfter“ usw.

Als nächster Schritt wurde betrachtet, welche Sensorsignal der einzelnen verbauten Komponenten in der Maschinen- und Komponentensteuerung verfügbar sind und wie deren Aussagefähigkeit bezüglich des Energieverbrauchs ist. Als Ergebnis wurden die gruppierten Verbraucher in die folgenden Kategorien eingeteilt:

- „Immer an“
- „Ohne AN/AUS Information in der Steuerung“

- „Mit AN/AUS Information in der Steuerung“
- „Mit analoger Information in der Steuerung“

Bei den beiden letztgenannten Kategorien handelt es sich um „Zuschaltbare Verbraucher“, wohingegen Komponenten, die immer in Betrieb sind die Kategorie der „Grundlastverbraucher“ bilden [VER11b].

Problematisch stellt sich die Kategorie „Ohne AN/AUS Information in der Steuerung“ dar. Die hierin vorhandene Komponenten (wie z.B. eine Schaltschränkkühlung) verfügen über eine interne Regelung um sich bei einem von Komponentenhersteller definierten Grenzwert an- oder abzuschalten.

Die Gruppierung einer nach den beschriebenen Gesichtspunkten untersuchten Maschine befindet sich in Bild 4-1.

Steuersignale der Energieverbraucher	Defizite									
	Grundlastverbraucher				Verbraucher V100					
	Immer an				Zuschaltbare Verbraucher					
					Ohne AN/AUS-Info an die Steuerung	Mit AN/AUS-Info an die Steuerung		Mit analoger Info an die Steuerung		
	Rechenheiten (NCU, PCU...)	Schaltkreise (SPS, Verbraucher...)	I/A-Geräte (Bedienfeld, Monitor...)	Leuchten, Lüfter...	Leuchten, Lüfter...	Ver- und Entsorgungseinheiten	Handhabungsgeräte	Achs- und Spindelbremsen	Achsspindeln	Leistungsspindeln
	A48 Modem (2kW) A-NCU (400W)	A2...A3 Anschaltung A6 (0,1...A20) Einzelheizung A8 (Einzelblock (8kW) A10 (7/8-Modul A-480... A-495 Verbraucher... abwärtig	A80...A82 Bedienfeld	E4 Maschinenleuchte (18kW) E5 Maschinenleuchte (18kW) M1 Lüfter (17kW) M2 Lüfter (17kW) Q2.5 Modullüfter	M80.0.1 Lüfter (120kW)	M80.0 Hydraulikaggregat (1,15kW) M80.0 Kühlmittelpumpe (1,5kW) M13.0 (Jahre-Förderer (1,25kW)	M85.0 Förderband (0,3 7kW)	M-21 Achsspindel (1,17kW) M-23 Achsspindel (1,17kW) M-25 Achsspindel (1,17kW) M-54 Hauptspindel	M-01 Achsspindel (1,25kW) M-02 Achsspindel (1,25kW) M-23 Achsspindel (1,25kW)	M-04 Hauptspindel (10,5kW)
	Ca. 0,5 kW				Ca. 0,1 kW	Ca. 0,6 kW			Ca. 10 kW	

Bild 4-1: Kategorisierung des Energieverbrauchs Index V100

Zur Bestimmung des gesamten Energieverbrauchs müssen die Komponenten „Ohne AN/AUS Information in der Steuerung“ um zusätzliche Messmittel ergänzt werden. Grundsätzlich stehen hierfür zwei Ansätze zur Verfügung, um den Energieverbrauch in der Steuerung anzuzeigen.

Der erste Ansatz besteht darin, die Messmittel in den Feldbus zu integrieren oder diese über SPS-Klemmen verfügbar zu machen. Durch diesen echtzeitfähigen Ansatz stehen Messwerte unmittelbar nach deren Erfassung zur Verfügung.

Ein zweiter Ansatz besteht darin, den in den meisten Steuerungen vorhandenen Netzwerkanschluss als Eingang für die vom Messmittel erfassten Messwerte zu nutzen. Im Handel erhältliche Messklemmen stellen (z.B. über eine MiniSPS mit integriertem OPC Server) Messwerte zur Verfügung. Diese können durch die Steuerung (falls diese Integration von Code erlaubt) ausgelesen werden. Im Vergleich zur Integration der Messmittel in den Maschinenbus ist dieser Ansatz zur Integration von Messmitteln in die Steuerung durch OPC nicht echtzeitfähig. Dies ist begründet auf die Nutzung von OPC und die damit verbundene Verwendung von Ethernet als Übertragungsprotokoll.

Welcher Ansatz zur Bestimmung des Energieverbrauchs in der Maschine bzw. Anlage genutzt wird, hängt von der benötigten Zykluszeit ab, die das Messmittel bereitstellen soll. Bei Komponenten mit einem sehr dynamischen Verbrauchverhalten ist einer Integration des Messmittels in den Feldbus sinnvoll. Ansonsten kann die Verwendung von OPC basierenden Messmitteln erfolgen.

Da aus den Verbrauchern „Mit AN/AUS Information in der Steuerung“ kein direkter Energieverbrauch abgeleitet werden kann, müssen diese Informationen mit Modellen gekoppelt werden, die den Zustand der Komponente als Eingangsgröße nutzen um den Energieverbrauch zu rekonstruieren und als Ausgangsgröße zurückzugeben.

## 4.2 Energieinformationsbeschreibung (EIDL)

*J. Schlechtendahl, Ph. Eberspächer, A. Verl*

Um die Energiebedarfsinformationen zusammenzuführen und sowohl in Simulationswerkzeugen wie auch in der Steuerungstechnik nutzen zu können, wurde die Beschreibungssprache „Energy Information Description Language“ (EIDL) entwickelt. Die Beschreibungssprache beschreibt - im Gegensatz zu existierenden Beschreibungssprachen aus dem Bereich der Maschinendiagnose - die energetischen Zusammenhänge.

Die Grundlage für EIDL bildet ein Klassenschema der möglichen Maschinenkomponenten hieraus kann eine Beschreibung der Komponenten, die in einer Werkzeugmaschine vorhanden sind, abgeleitet werden. Für jede Komponente, die in EIDL abgebildet worden ist, werden in EIDL Energieinformationen hinterlegt. Diese Energieinformationen geben u.a. Auskunft darüber, welche Energiemesswerte genutzt werden können (siehe Bild 4-2). Liegen zum Beispiel Verbraucher mit „Mit analoger Information in der Steuerung“ vor, wird die benötigte Information um die Verbrauchswerte über den Feldbus oder direkt über die SPS auszulesen in EIDL abgelegt.

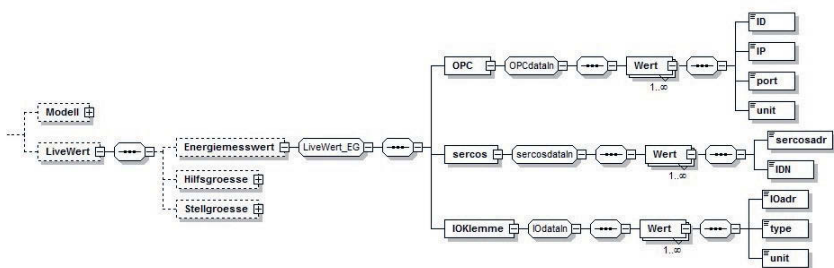


Bild 4-2: Übersicht über Energiemesswerte in EIDL

Existiert zu einzelnen Verbrauchern keine Information über ihren Zustand und damit über ihren Energieverbrauch – es handelt sich also um Verbraucher der Kategorie „Ohne AN/AUS Information in der Steuerung“ – können die zur Verbrauchsermittlung benötigten Messmittel ebenfalls in EIDL integriert werden (z.B. über OPC). Identisch zur Erfassung der analogen Information steht eine Beschreibungsform zur Verfügung um die Messwerte der Messmittel auslesen zu können.

Um die Modelle sowohl auf Planungsebene, als auch auf der Maschinensteuerung gezielt einsetzen zu können, wurde EIDL auch um die Beschreibung von relevanten Informationen für Modelle erweitert. Um die notwendigen Modellinformationen in EIDL zu integrieren, werden für jede Komponente Energieinformationen des Modells hinterlegt (siehe Bild 4-3). Ein Komponenten Modell kann hierbei entweder in sich geschlossen sein (*simples Modell*), oder auf Sub-Modelle zurückgreifen (*aggregiertes Modell*). Um die Modelle nutzen zu können, werden die Inputs, Outputs und auch die Parametrierung in EIDL integriert.

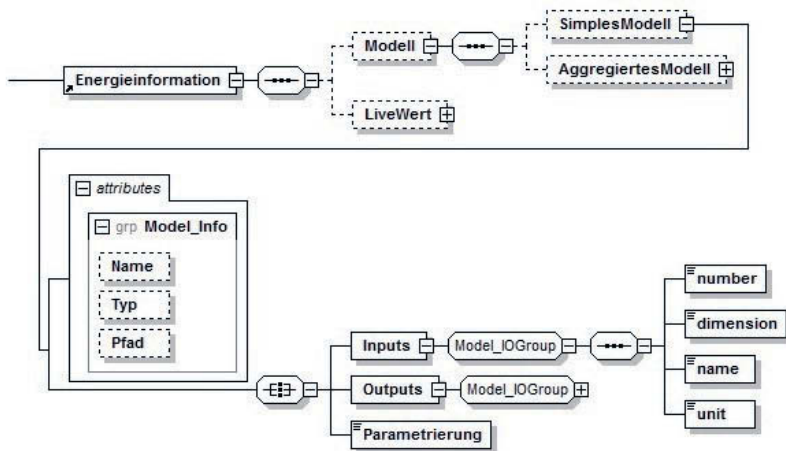


Bild 4-3: Modelle in EIDL

Implementiert wurde EIDL als XML-Schema. Hieraus kann eine Maschine mit den gewünschten Komponenten in Form einer XML-Datei abgeleitet werden. Diese XML-Datei kann nun dazu verwendet werden, auf der Steuerung die gewünschten Live-Werte und Modelle zu verknüpfen um ein Energiemonitoring zu betreiben.

### 4.3 ECIS – EIDL Erzeugung

*Ph. Eberspächer, J. Schlechtendahl, A. Verl*

Um den Aufwand bei der Erstellung einer EIDL-Beschreibungsdatei (XML-Datei) konform zu EIDL (XML-Schema) zu reduzieren, wurde ein entsprechendes Software-Framework geschaffen. Das Energyconsumption-Information-System (kurz ECIS) unterstützt den Bediener bei der Definition der in einer Maschine verbauten Komponenten sowie bei der Integration der für

diese Komponenten verfügbaren Informationen und als Ergebnis liegt die XML-Maschinenbeschreibung vor (siehe Bild 4-4).

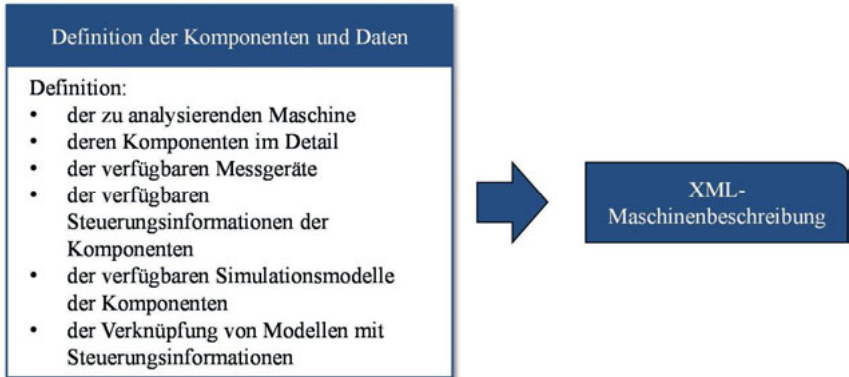


Bild 4-4: Vorgehen in ECIS

Der Nutzer startet zunächst mit einem leeren Maschinenknoten und hat dann die Möglichkeit über die in Bild 4-5 im linken Bereich von ECIS vorhandenen Smart-Choice nur EIDL-konforme Komponenten auszuwählen. In diesem Fall sind also nur Hauptkomponenten der Maschine möglich, wie bspw. ein Versorgungsmodul (supply\_unit), ein Werkstück- und Werkzeugwechselsystem, Elemente des Gehäuses (z.B. Beleuchtung) und die Steuerung. Fügt man nun eine Versorgungseinheit ein, so können darunter die Achsantriebe der Maschine integriert werden. In Bild 4-5 ist zu erkennen, dass die beispielhaft erzeugte Maschine unter anderem über jeweils eine C-, X-, Y- und V-Achse verfügt (die Hauptspindel und die B- und Z-Achse sind im Screenshot nicht sichtbar). Für jede Komponente fügt der Nutzer dann verfügbare Steuerungsinformationen, Modelle und ggf. Messgeräte hinzu (vgl. Bild 4-2 und Bild 4-3). Sobald eine Komponente zum ersten Mal innerhalb von ECIS angelegt wurde, wird diese in der ECIS-Datenbank abgelegt. Wird

demnach eine identischer bzw. zumindest ähnliche Komponente zu einer Maschinenbeschreibung hinzugefügt, so muss der Nutzer nicht erneut alle Informationen hinzufügen, sondern ggf. nur IP-Adressen für die Kommunikation anpassen.

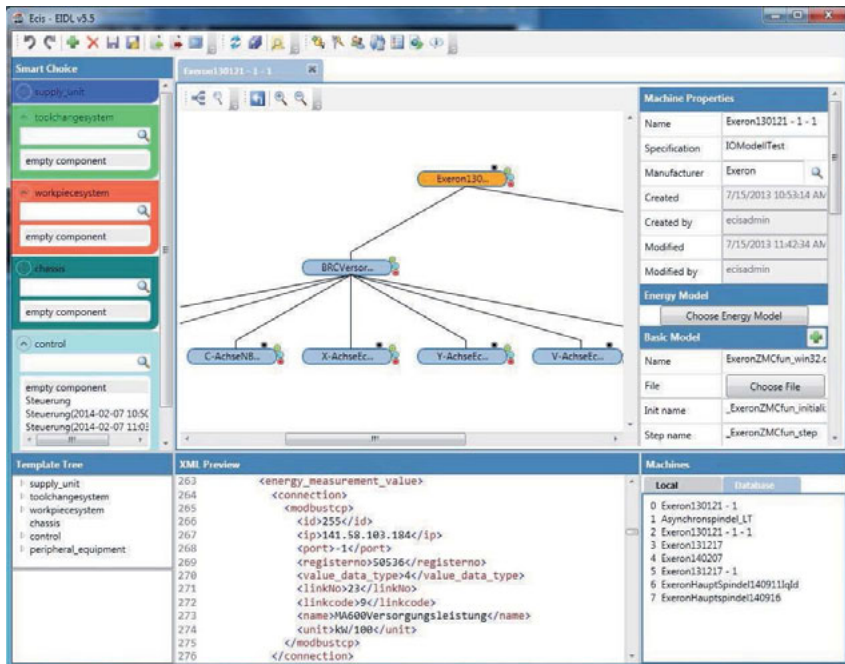


Bild 4-5: Screenshot des Energyconsumption-Information-System ECIS

In derselben Datenbank werden auch komplette Maschinenbeschreibungen abgespeichert und können beliebig erweitert und angepasst werden. Als Ergebnis liegt dann die XML-Beschreibung der definierten Maschine vor (siehe Bild 4-5 unten).



#### 4.4 ECIS – Energiebedarfsmonitor

*J. Schlechtendahl, Ph. Eberspächer, A. Verl*

ECIS erfüllt neben der Erzeugung und Verwaltung von EIDL-Maschinenbeschreibungen noch eine weitere relevante Aufgabe aus. Der zweite Teil von ECIS ist ein modellbasierter Energieverbrauchsmonitor (siehe Bild 4-6).

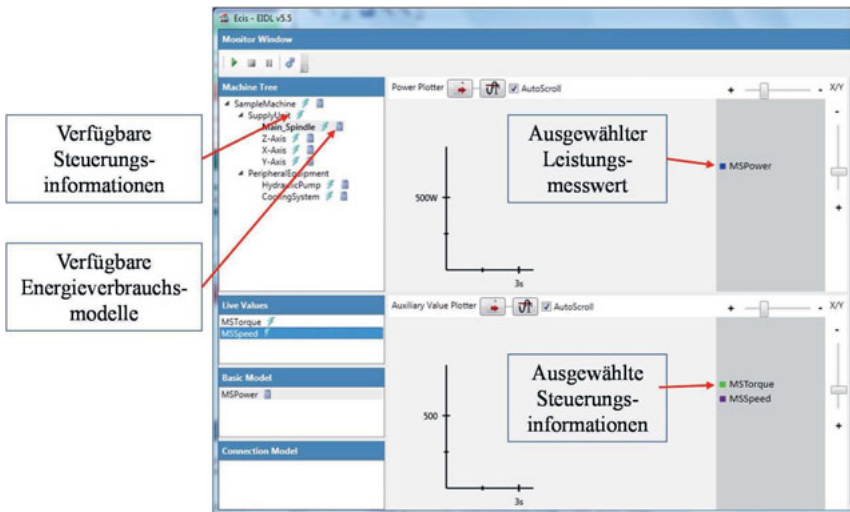


Bild 4-6: Screenshot des ECIS-Energieverbrauchsmonitors

Der ECIS-Monitor besteht hauptsächlich aus zwei Darstellungsfenstern: das obere stellt die jeweils ausgewählten Leistungsmesswerte als Zeitverlauf dar, das untere zeigt die entsprechend ausgewählten Steuerungsinformationen. Die Auswahl der darzustellenden Zeitmessschriebe erfolgt über den linken Teil in dem der EIDL-Baum der geladenen Maschinenbeschreibung darge-

stellt ist. Für jede Komponente ist direkt zu erkennen ob Steuerungsinformationen und Verbrauchsmodelle verfügbar sind. Details hierzu geben die folgenden Subkapitel.

Wie in Bild 4-7 Punkt 1 dargestellt, können unterschiedliche Hilfsgrößen mit ECIS angezeigt werden, die sich über den Verlauf der Zeit verändert haben.

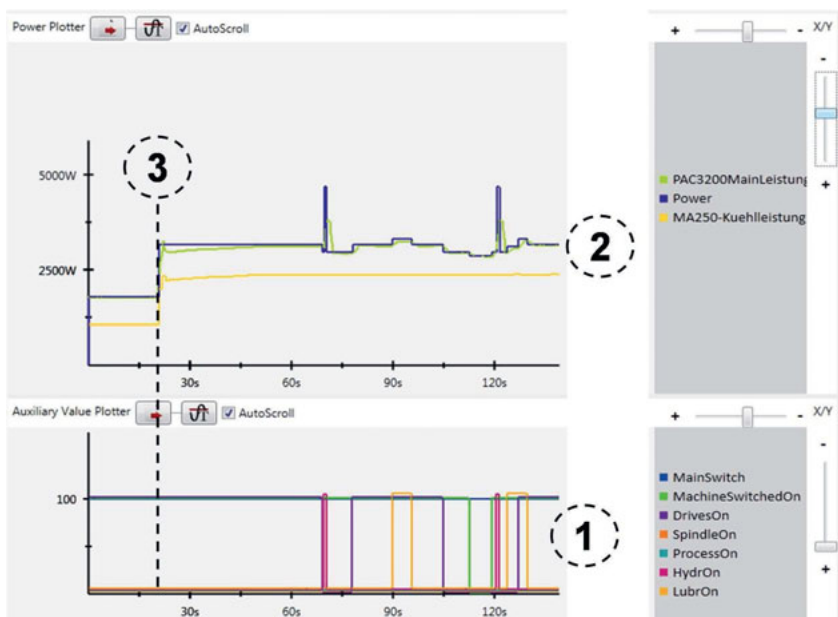


Bild 4-7: Bereitstellung des energetischen Istzustands im Demonstrator

Die Erfassung der Hilfsgrößen erfolgt in diesem Fall über OPC UA direkt aus der Steuerung. Die Verknüpfung der Hilfsgrößen mit einem Zustandsmodell ist in Bild 4-7 Punkt 2 durch den Graphen „Power“ dargestellt. Durch ein Messgerät am Hauptanschluss wurde die Anschlussleistung der Werkzeugmaschine ermittelt, diese ist als Graph „PAC3200MainLeistung“ ebenfalls visualisiert. Als Protokoll zur Anbindung des Messgeräts kam dabei

ModbusTCP zum Einsatz, um die Werte aus dem Messgerät auszulesen. Durch Vergleich der Graphen „Power“ mit „PAC3200MainLeistung“ lässt sich die gute Übereinstimmung des Modellbasierten Konzeptes im Vergleich mit einer direkten Messung ableiten. Lediglich bei Leistungsspitzen zeigt das Messgerät einen leichten zeitlichen Versatz (bedingt durch die langsamere Kommunikation über ModbusTCP) sowie eine nicht gleichgroße Auslenkung (bedingt durch die Abtastrate des Messgeräts).

Zum Zeitpunkt, der in Bild 4-7 mit Punkt 3 markiert ist, ist keine Änderung der Hilfsgrößen der Werkzeugmaschine im unteren Teil der Abbildung erkennbar, trotzdem ändert sich im Graphen „Power“ der Energieverbrauch und damit der energetische Istzustand. Hierbei handelt es sich um ein hybrides Konzept: Das Messgerät MA250-Kuehlleistung erfasst die Kühlleistung des Kühlaggregats der Hauptspindel und des Schaltschranks, die nicht steuerungsseitig erfasst werden kann. Das Kühlaggregat der für die Realisierung genutzten Werkzeugmaschine Exeron HSC 600 besitzt keine Verbindung zur Steuerung und schaltet die Kühlung selbstständig, basierend auf einem Temperaturfühler, ein und aus. Die gemessene Kühlleistung dient gleichzeitig als Eingang für das Zustandsmodell.

Wie bereits beschrieben, setzen die Erfassungsmodule in ECIS für Messgeräte und Komponenten unterschiedliche Mechanismen zur Erfassung von energetischen Informationen um. Abhängig von dem in der Gerätebeschreibungsdatei beschriebenen Kommunikationsprotokoll, werden die Komponenten und Messgeräte angesprochen und die benötigte Information ausgelesen. Zur Anbindung der NC-Steuerung bzw. SPS können entweder herstellerspezifische Schnittstellen wie ADS oder DDE oder der Standard OPC UA inklusive des Profils für Werkzeugmaschinen genutzt werden, welches sich

aktuell in der Entwicklung befindet [KEI14]. Im Hinblick auf die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Standardisierung von OPC UA-Profilen für Werkzeugmaschinen wurde zur NC- bzw. SPS-Anbindung OPC UA eingesetzt. Die Anbindung erfolgt analog zu Messgeräten über die OPC UA-Schnittstelle, indem die Variablen der NC bzw. SPS als Hilfsgrößen in EIDL abgelegt werden.

Müssen die erfassten energetisch relevanten Informationen durch Modelle weiterbearbeitet werden oder stehen nur Modelle wie zum Beispiel für Bedienpanels zur Verfügung, werden diese Modelle in einem Simulationsmodul berechnet. Hierfür werden die Modelle über die in EIDL definierte Schnittstelle geladen und ggf. mit ebenfalls in EIDL beschriebenen energetisch relevanten Informationen aus den Erfassungsmodulen verknüpft. Durch Berechnung der energetischen Modelle stehen dann der Energieverbrauch und ggf. energetisch relevante Informationen zur Verfügung.

Um die Bereitstellung des Istzustandes einheitlich und modulunabhängig zu gestalten, werden alle relevanten Informationen, wie in Bild 4-8 in „IDatasource“ gezeigt, über eine einheitliche Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Diese abstrahiert den Zugriff auf Messgeräte, Komponenten, Steuerung (NC + SPS) und Simulation auf einen einheitlichen Aufruf. Ändert sich eine energetisch relevante Information, wird dies über den Event „externalValueChange“ mitgeteilt.

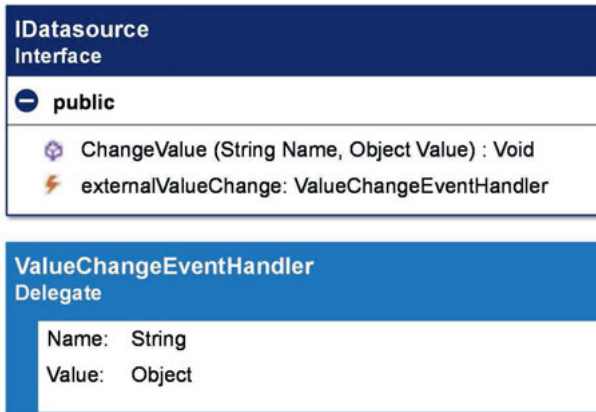


Bild 4-8: Einheitliche Schnittstelle für Datenzugriff

Durch die Nutzung der in EIDL vorhandenen Informationen kann der energetische Istzustand der Werkzeugmaschine ermittelt werden. Bereits hierdurch kann eine Überwachung aller energetisch relevanter Informationen bzw. des energetischen Istzustandes erfolgen.

#### 4.4.1 Konstantmodelle

In Bild 4-7 Punkt 2 stellt der Graph „Power“ die durch ein Konstantmodell berechnete Gesamtleistungsaufnahme der Maschine dar. Als Input dienen wie beschrieben die von der SPS zur Verfügung gestellten Hilfsgrößen.

Das Konstantmodell ist ein rein mathematisches Modell, das für jeden Input einen entsprechenden Output bereitstellt und dabei nicht den jeweils vorangegangenen Input berücksichtigt. Für jede Komponente deren Zustand erfasst wird, ist eine konstante Leistungsaufnahme hinterlegt. Ist der Zustand der Komponente aus, so wird für diese Komponente die Leistungsaufnahme auf 0 gesetzt, ist die Komponente eingeschaltet, wird der hinterlegte Wert in die

Gesamtleistungsberechnung aufgenommen. Wie in Bild 4-7 zu erkennen zeigt sich eine gute Überdeckung der berechneten Werte mit den gemessenen.

Vor allem in eingeschwungenen Zuständen ist das Konstantmodell vollkommen ausreichend. Dies ist immer dann der Fall wenn Komponenten abzubilden sind, die eine annähernd konstante Leistungsaufnahme aufweisen. Lediglich beim Anlauf der Komponenten stimmt die berechnete Leistungsaufnahme nicht mit der tatsächlichen überein.

### 4.4.2 Dynamische Modelle

Sobald aber Komponenten aktiv sind, die über eine variable Leistungsaufnahme verfügen, können die Konstantmodelle nicht mehr zufriedenstellend eingesetzt werden. Dies ist z.B. bei den Positionierachsen und der Hauptspindel von Werkzeugmaschinen der Fall. Bei deren Betrieb wechseln sich Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen mit Phasen konstanter, jedoch variable Geschwindigkeit und Drehzahl ab. Die Leistungsaufnahme variiert dabei stark, kann jedoch von dynamischen Modellen abgebildet werden.

---

## 5 Maßnahmen zur Energiebedarfsreduktion

### 5.1 Ansatzpunkte zur Minimierung des Energieverbrauchs

*J. Schlechtendahl, Ph. Eberspächer, A. Verl*

Um den Energieverbrauch zu reduzieren, sind Stelleingriffe notwendig, die dies in heutigen Werkzeugmaschinen erlauben. *Zein et al.* haben die dabei zur Verfügung stehenden Stelleingriffe, wie in Bild 5-1 beschrieben, strukturiert [ZEI11]. Soll eine energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen erreicht werden, sind vor allem die Stelleingriffe relevant, die während des Betriebs der Werkzeugmaschine angewendet werden können. Hierzu zählen aus dem Bereich der Prozessplanung die Reduktion der Bearbeitungszeit sowie die Vermeidung von Aufgaben, die nicht zur Wertschöpfung beitragen. Bei der Bearbeitung von Werkstücken kann durch die effektive Nutzung der vorhandenen Komponenten, die Reduktion des Energieverbrauchs der Komponenten auf ein Minimum sowie die Minimierung des Energieverbrauches, um den Prozess zu betreiben, Energie gespart werden.

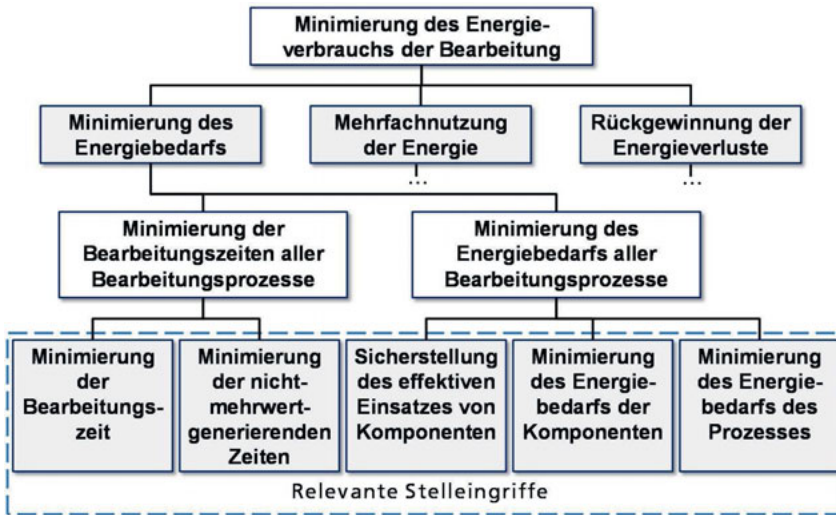


Bild 5-1: Stelleingriffe zur Energieverbrauchsminimierung (vgl. Zein et al. 2011)

Auch Gontarz *et al.* schlagen für den Retrofit von Werkzeugmaschinen zur Energieverbrauchsminimierung eine Gruppierung der Stelleingriffe in fünf mögliche Gruppen vor. Die Gruppen wurden dabei nach aufsteigendem Realisierungsaufwand angeordnet [GON13].

1. Erweiterung der Werkzeugmaschinen in der Form, dass Komponenten ausgeschaltet werden, wenn diese nicht gebraucht werden,
2. Anpassung der Ansteuerung der Komponenten der Werkzeugmaschinen an die Bearbeitungsaufgaben,
3. Austausch von Komponenten der Werkzeugmaschinen durch effizientere Komponenten,
4. Austausch von Komponenten durch Komponenten mit gleichem Funktionsumfang aber effizienterer Arbeitsweise,
5. Kombination aus den Punkten 1 – 3.



Auch *Beck und Gohner* führen an, dass sowohl der Aufbau eines Systems als auch das Verhalten des Systems berücksichtigt werden müssen, um den Energieverbrauch zu minimieren. Weiterhin sehen *Beck und Gohner* die Notwendigkeit, zusätzlich die umweltbedingten Einflüsse als auch das Nutzerverhalten zu betrachten [BEC10].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sowohl *Zein et al.*, *Gontarz et al.* als auch *Beck und Gohner* Möglichkeiten zur steuerungsbasierten Minimierung des Energieverbrauchs durch Stelleingriffe bzw. in der situationsorientierten Parametrierung zur Reduktion des Energieverbrauchs sehen.

Prinzipiell können die zwei Ansätze nach *Zein et al.* und *Gontarz et al.* durch eine energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen umgesetzt werden, um den Energieverbrauch zu minimieren. Im ersten Ansatz werden steuerungstechnische Stelleingriffe durchgeführt, um den Energieverbrauch zu minimieren, wohingegen im zweiten Ansatz die energieminimale, situationsorientierte Parametrierung der Komponenten im Mittelpunkt steht. Mögliche Realisierungen beider Ansätze sollen im Folgenden erörtert werden.

## 5.2 Prozessoptimierer

*S. Braun*

Die vorangegangenen Kapitel zeigen, dass das Optimierungspotenzial auf Prozessseite bei fest vorgegebenem NC-Programm, d.h. nicht veränderbarer Werkzeugbahn und Bahnaufteilung sehr beschränkt ist. Einen entscheidenden Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch haben bei gegebener Prozessführung die Maschinenkomponenten und die adäquate, d.h. bedarfsgerechte

und situativ angepasste Zustandssteuerung der Maschine und ihrer Komponenten. Insbesondere bei Werkzeugmaschinen und Anlagen mit hohem, dominierendem Grundlastanteil ist die effektivste Eingriffsmöglichkeit seitens der Prozessführung durch eine Verkürzung der Bearbeitungszeit bzw. Taktzeit gegeben. Nur so gelingt es, die Zeiten, in denen der hohe Grundlastanteil anfällt, möglichst kurz zu halten. Dies senkt den Stück-Energieverbrauch pro gefertigtem Werkstück. In Nebenzeiten und unproduktiven Zeiten muss dann dafür gesorgt werden, dass kein unnötiger Grundlastanteil anfällt. Dies gelingt am effektivsten durch eine steuerungsbasierte adaptive ECOMATION Verbrauchszustandssteuerung der ganzen Maschine und einzelner Komponenten. Die Messungen und Auswertungen sowie zahlreiche Simulationen haben gezeigt, dass in vielen Fällen eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit durch die damit verbundene Drehzahlsteigerung der Hauptspindel einen negativen Effekt auf die Leistungsaufnahme und über die Bearbeitungsdauer somit auch auf den Energieverbrauch hat. Eine Verringerung der Drehzahl und damit Reduktion der Leistungsaufnahme ist generell möglich, ist jedoch aus technologischen Gründen nicht immer sinnvoll und zudem aus einem anderen Grund kontraproduktiv: eine effektive prozessseitige Reduzierung des Energieverbrauchs lässt sich nämlich nur durch Verkürzung der Bearbeitungszeit erreichen. Dies ist bei gegebenem NC-Programm nur durch eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit möglich. Aus diesem Grunde ist eine Reduzierung der Hauptspindeldrehzahl wenig empfehlenswert, da es dadurch zu einer weiteren Zunahme des Zahnvorschubs und der mittleren Spandicke kommt.

Erhöhte oder erniedrigte KSS-Zufuhr spielt in energetischer Hinsicht in Bezug auf den Leistungsbedarf der Aggregate eine untergeordnete Rolle. Bei

ungeregelten Pumpen ist bei einer Drosselung des KSS-Volumenstroms oftmals sogar eine leichte Verbrauchszunahme zu beobachten. KSS muss jedoch so dosiert werden, dass die Zerspanzone ausreichend gekühlt und geschmiert wird.

Bei einer Optimierung auf der Basis dieser Präambeln gilt es also, den Vorschub so weit als möglich zu erhöhen ohne Einbußen bei nichtenergetischen Kenngrößen, insbesondere der thermischen und mechanischen Belastung des Werkzeugs inklusive Verschleiß, zu erleiden. Aus diesem Grunde wurde bei der Modellbildung zuvor versucht, die nichtenergetischen Größen zumindest näherungsweise abschätzen zu können. Die prozessseitigen Optimierer basieren auf der Grundprämisse der Bearbeitungszeitverkürzung.

### **5.2.1 Prozessoptimierer**

Der entworfene Prozessoptimierer stellt im Wesentlichen eine Umsetzung des oben beschriebenen Sachverhalts dar. Die Datenbasis und -struktur für den Optimierungsalgorithmus ergibt sich aus der Datenstruktur des Frameworks innerhalb der Steuerung. Die dort von den einzelnen Echtzeitmodulen gebündelten und zur Verfügung gestellten Variablen können für den Optimierungsalgorithmus eingelesen und nutzbar gemacht werden. Als verfügbare Stellhebel für die Optimiererausgänge ergeben sich bei nicht veränderbarem NC-Programm lediglich der Vorschub-Override und ein Eingriff in die programmierte Hauptspindeldrehzahl über den Spindel-Override. Aus den in der Einleitung genannten Gründen hat eine Vorschuberhöhung über die programmierten Werte hinaus den größten Effekt. Der Optimiereralgorithmus selbst stellt eine Hardlimiter-Funktionalität bereit. Diese versucht, den Vorschub bis zu einem vom Benutzer definierten zulässigen Höchstwert

über den programmierten Wert hinaus zu steigern. Daraus ergeben sich jedoch Auswirkungen auf nichtenergetische Effekte, die nicht in einem festen, einmalig programmierbaren gesetzmäßigen Zusammenhang mit der Vorschuberrhöhung stehen. Vielmehr hängen die Auswirkungen insbesondere auf thermische und mechanische Werkzeugbelastung sowie auf den Schneidenverschleißfortschritt von der im Einzelfall geforderten Bearbeitung und den dabei lokal teils stark veränderlichen Eingriffsbedingungen des Werkzeugs ab. Da der Aufwand, einen steuerungsinternen Optimierer auf einen speziellen Prozessablauf hin zu konditionieren und zu parametrieren unter Umständen groß sein kann und jener somit seine Allgemeingültigkeit verliert, wird ein anderer Ansatz verfolgt. Das Hardlimiting bezieht die wichtigsten nichtenergetischen Kenngrößen mit ein und es können obere Grenzwerte für die thermische Last, die Spanflächenbelastung und die Werkzeugbeanspruchung gesetzt werden sowie eine obere Grenze für den Verschleißfortschritt im Sinne einer maximalen Verschleißrate  $dW_v/dt$ . Werden diese Grenzen erreicht, so wird die Vorschubgeschwindigkeit mit einer definierten Rampe zurückgenommen, jedoch niemals unter den programmierten Wert. Bild 5-2 zeigt das Blockschaltbild des Algorithmus "Hardlimiting".

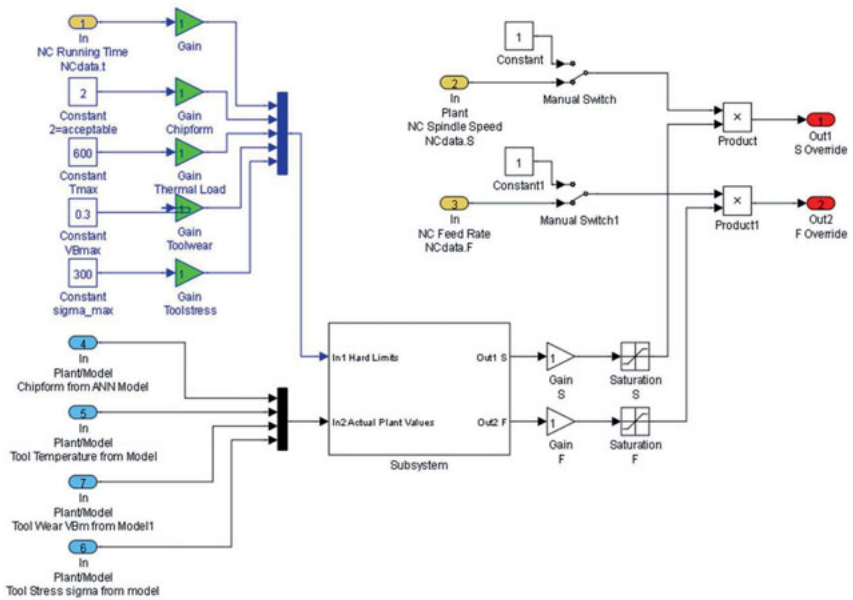


Bild 5-2: Blockdiagramm des prozessseitigen Optimierungsalgorithmus "Hardlimiter"

Die Implementation in die ECOMATION Offline-Simulationsumgebung (vorgestellt in Kapitel 3) zeigt eine erwartete, jedoch geringe Einsparung (Bild 5-3). Die Prozesszeit hat sich insgesamt um 72 s verkürzt, die Energieeinsparung beträgt 4.1%. Durch die veränderten Achs- und Hauptspindellasten kommt es zudem zu einem früheren Anlaufen des Kühlaggregates.

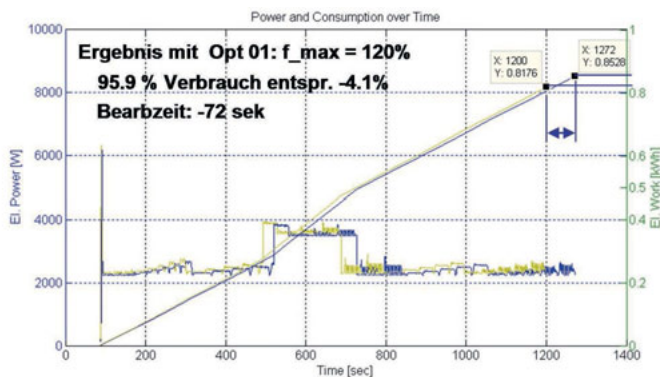


Bild 5-3: Einsparung des prozesseitigen Optimierungsalgorithmus "Hardlimiter"

### 5.3 Komponententoptimierer

*E. Abele, P. Schraml*

Bedingt durch den modularen Aufbau von Werkzeugmaschinen und die Vielzahl an unterschiedlichen Komponentenherstellern kann es aus Energieeffizienz-Gesichtspunkten zu einer nicht optimalen Regelung des Gesamtsystems Werkzeugmaschine kommen. Insbesondere Funktionsmodule mit autonomer Regelung (bspw. Maschinenkühlung) oder unregelmäßige Aggregate (bspw. Absaugung) weisen durch die Einbeziehung in ein einheitliches und komponentenübergreifendes Regelungskonzept Energieeinsparpotenziale auf. Basierend auf dem im Rahmen der Forschergruppe ECOMATION entwickelten Maschinenstrukturmodells [SCH12], wurden die energiebedarfsrelevanten Funktionsmodule einer Werkzeugmaschine hinsichtlich ihres Optimierungspotenzials und den Möglichkeiten der Einflussnahme untersucht [SCH15a].

### 5.3.1 Beleuchtung

Auch wenn die Maschinenbeleuchtung nicht der Haupttreiber für den Energiebedarf einer Werkzeugmaschine ist, kann über eine einfache Optimierung eine deutliche Einsparung erzielt werden. In Anlehnung an einen Bildschirmschoner eines PCs wurde ein Optimierer programmiert, welcher die Arbeitsraumbeleuchtung in Abhängigkeit der letzten Maschinenbedienereingabe auf dem Bedienpult der Werkzeugmaschine schaltet. Wird für einen frei zu definierenden Zeitraum vom Nutzer keine Bedieneraktivität registriert, wird die Arbeitsraumbeleuchtung deaktiviert bzw. bei Bedieneraktivität wieder aktiviert (vgl. Bild 5-4).

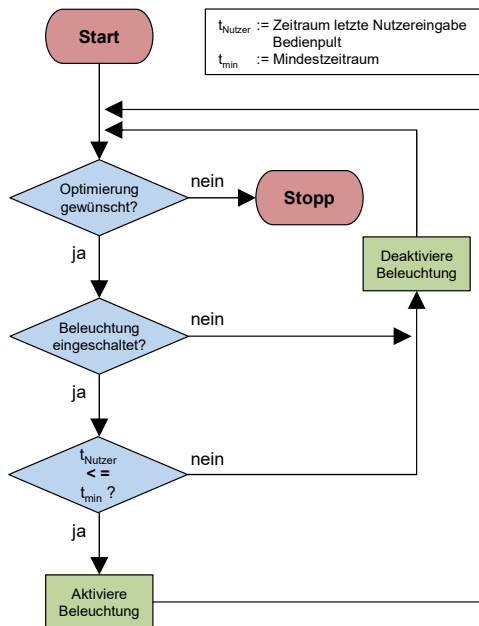


Bild 5-4: Funktionsweise modellbasierter Komponentenoptimierer Beleuchtung

### 5.3.2 Absaugung

Im Auslieferungszustand der Demonstratormaschine DIGMA Exeron HSC 600 wurde die Maschinenabsaugung über einen M-Befehl im NC-Code aktiviert bzw. deaktiviert. Bei Werkzeugmaschinen mit Hochdruck-KSS ist die Absaugung zudem häufig auch an die Aktivität der Hochdruckpumpe gekoppelt.

Mit einer durchschnittlichen elektrischen Leistungsaufnahme von ca. 400W und Einschaltlastspitzen von etwa 2000W trägt die untersuchte Maschinenabsaugung wesentlich zum Energiebedarf der Demonstratormaschine bei. Im ersten Optimierungsschritt wurde deshalb der Betrieb der Absaugung mit der Hauptspindeldrehzahl und der SPS-Freigabe (M-Befehl Aktivierung Absaugung) verknüpft. So soll der bedarfsgerechte Betrieb der Absaugung gewährleistet sein. Der genaue Ablauf des modellbasierten Komponentenoptimierers ist Bild 5-5 zu entnehmen.



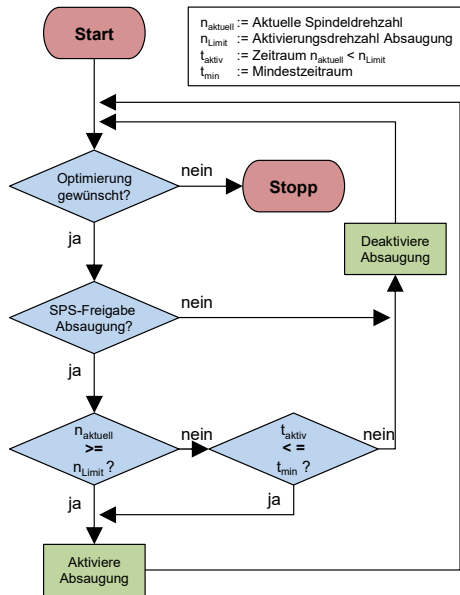


Bild 5-5: Funktionsweise modellbasierter Komponentenoptimierer Absaugung

### 5.3.3 Maschinenkühlung

Die Maschinenkühlung ist der Hauptenergieverbraucher an der Demonstratormaschine. Das Kühlmedium im internen Tank des Rückkühlaggregates wird über einen Hysteresebetrieb des Kühlkompressors innerhalb eines Temperaturbereichs gehalten, während die Umwälzpumpe kontinuierlich das Kühlmedium im Kühlkreislauf zirkulieren lässt. Im Auslieferungszustand der Maschine konnte dieses Verhalten nicht beeinflusst werden, da technisch keine Eingriffsmöglichkeiten vorgesehen waren. Entsprechend wurde das Rückkühlaggregat dahingehend umgebaut, dass sowohl die Umwälzpumpe als auch der Kompressor unabhängig voneinander geschaltet werden können. Darauf aufbauend wurde ein Optimierer entwickelt, welcher

den Hysteresebereich in den Maschinennebenzeiten vergrößert und sowohl die Schalthäufigkeit verringert als auch die Energieaufnahme des Kompressors reduziert (vgl. Bild 5-6). Da es keine separate SPS-Freigabe für das Rückkühlaggregat gibt, kann diese in der Schaltlogik vernachlässigt werden.

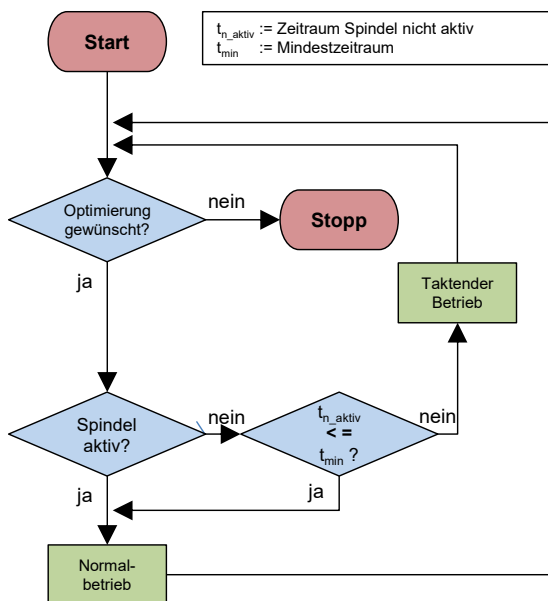


Bild 5-6: Funktionsweise modellbasierter Komponentenoptimierer Maschinenkühlung

### 5.3.4 Hydrauliksystem

Das Hydrauliksystem der Demonstratormaschine wird u.a. für die Lösung der Achsklemmung genutzt. Da dies nur während Achsbewegungen im Dauer- oder Einrichtbetrieb nötig ist, kann es in den restlichen Zeiten deak-

tiviert werden. Entsprechend wurde ein Optimierer entwickelt, welcher sowohl Achs- und Spindelaktivität als auch die letzte Bedienerinteraktion berücksichtigt. Liegt keine Spindel- bzw. Achsaktivität vor und die letzte Bedienereingabe liegt länger als  $t_{min}$  zurück, so deaktiviert der Optimierer die Hydraulikpumpe. Das entsprechende Ablaufdiagramm ist Bild 5-7 in dargestellt.

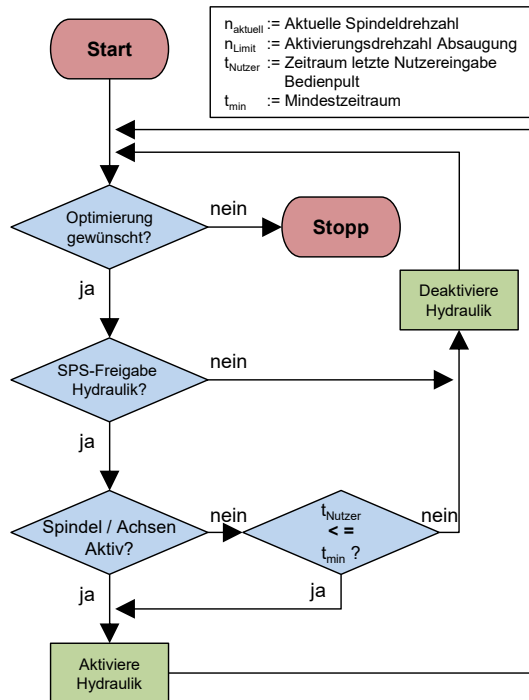


Bild 5-7: Funktionsweise modellbasierter Komponentenoptimierer Hydraulikaggregat

## 5.4 Betriebszustandsbasierte Energiebedarfsoptimierung

*Ph. Eberspächer, A. Verl*

Ein innerhalb der Forschergruppe in der Energieverbrauchssteuerung umgesetzter, modellbasierter Optimierer ermöglicht das energieoptimale Überbrücken von Produktionspausen, die von der Produktionssteuerung durch oben genannte Kommunikationsarchitektur an die Energieverbrauchssteuerung übermittelt werden. Der Energieverbrauchsoptimierer greift auf innerhalb der Forschergruppe entwickelte, betriebszustandsbasierte Energieverbrauchsmodelle [DIE08b] zurück, die für jeden Betriebszustand der Maschine die jeweils aktiven Komponenten und deren durchschnittliche Leistungsaufnahme ausgeben. Ein Betriebszustand ist in diesem Kontext aus Steuerungssicht z.B. „Betriebsbereit“, „Energiesparmodus“ oder „Fertigung“.

Für die Optimierung werden die Energieverbrauchsmodelle um weitere Daten, die das Maschinenverhalten beschreiben, erweitert. Dies sind zum einen Zeiten, die für den Wechsel von Betriebszuständen benötigt werden, z.B. die Dauer des Hochfahrens der Steuerung, bis diese grundsätzlich betriebsbereit ist, zum anderen fertigungs- oder betriebsbedingte Beschränkungen bei Betriebszustandswechseln. Zu den fertigungsbedingenden Beschränkungen zählen beispielsweise feste Warmlaufprogramme. Bei diesen Warmlaufprogrammen werden alle Achsen der Maschine bewegt, sodass sich ein einheitliches Temperaturniveau einstellt und die Einhaltung der Fertigungstoleranzen sichergestellt werden kann. Zu den betriebsbedingten Beschränkungen zählen unter anderem Vorschmierzyklen. Gerade bei HSC-Fräsmaschinen ist die Hauptspindel vor dem Einsatz in der Fertigung einem Vor-

schmierzyklus zu unterziehen, bei dem die Spindel mit konstanter Geschwindigkeit läuft und Schmieröl in das System eingebracht wird. Für beiden genannten Beispiele gibt es neben der reinen Zeitdauer auch Beschränkungen ab welchen Stillstands- oder Ausschaltzeiten die jeweiligen Zyklen erneut durchlaufen werden müssen. So kann der Vorschmierzyklus der Hauptspindel z.B. nach einem Stillstand von größer als 30 Minuten notwendig sein, die Warmlaufprogramme aber ggf. schon nach Stillständen von 15 Minuten. Diese Beschränkungen werden in den entwickelten Optimierern zunächst als reine zeitliche Beschränkungen integriert.

Die Kombination der Energieverbrauchsmodelle mit den Betriebszustandswechselzeiten und den Zeiten zur Berücksichtigung fertigungs- und betriebsbedingten Beschränkungen werden durch Energieverbrauchsgraphen abgebildet (vgl. Bild 5-8).

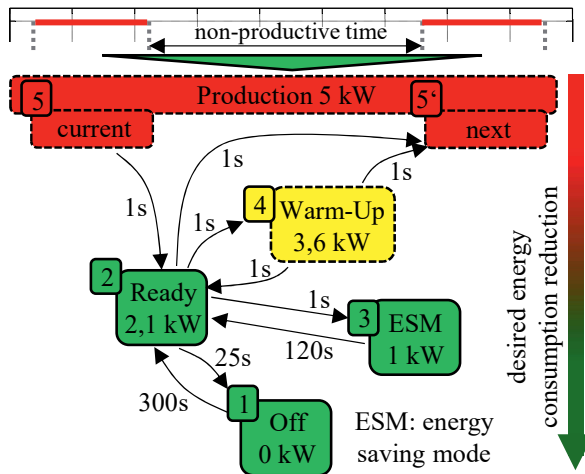


Bild 5-8: Energieverbrauchsgraph als Grundlage für die Energieoptimierung (aus [EBE13])

Durch die mehrfache Anwendung [EBE13] von graphenbasierten Optimierungsverfahren, wie bspw. den Dijkstra-Algorithmus, werden dann basierend auf der Führungsgröße, in diesem Fall die Vorgabe einer Pausenzeit bis zum nächsten Produktionszyklus, aus der Produktionssteuerung die optimale Betriebszustandsfolge ermittelt und über die Energieverbrauchssteuerung umgesetzt. Anhand des Energieverbrauchsgraphen aus Bild 5-8 lassen sich die unterschiedlichen Betriebszustandsfolgen zur Überbrückung der Pausenzeit (also von Betriebszustand 5 zu Betriebszustand 5') erkennen. Es kann bspw. die gesamte Pausenzeit in Betriebszustand 2 verblieben werden, oder aber in den Energiesparmodus Betriebszustand 3 gewechselt oder die Maschine gar komplett ausgeschaltet werden (Betriebszustand 1). Hier werden die betriebs- und fertigungsbedingten Randbedingungen vom Optimierer berücksichtigt. Verbleibt die Maschine länger als einen definierten Zeitraum in den Betriebszuständen Aus (1) oder Energiesparmodus (3), so wird der mögliche Betriebszustandsübergang von Ready (2) zu Produktion (5') blockiert und es muss das Warmlaufprogramm, der Betriebszustand 4, vor der Produktion (5') abgefahren werden. Der Optimierer prüft nun den energetisch optimalen Pfad, es wird demnach bspw. entschieden, ob die Maschine ggf. früher eingeschaltet wird, um das Warmlaufprogramm nicht abfahren zu müssen.

Der Optimierer ist durch den Energieverbrauchsgraphen auf unterschiedliche Maschinen parametrierbar und somit universell einsetzbar.

## 5.5 Energiebedarfsoptimale PPS

*S. Wahren, E. Colangelo, Th. Bauernhansl*

ECOMATION schafft neue Möglichkeiten, die Produktion unter Berücksichtigung der Energieeffizienz zu planen, während der Fertigung Abweichungen aufzuzeigen und steuernd einzugreifen.

Für eine nachhaltige und energieeffiziente Produktion ist ein ganzheitlicher Ansatz in verschiedenen Schichten und Ebenen der Steuerungshierarchie obligatorisch. ECOMATION behebt das Problem der Planung und Steuerung auf folgenden Ebenen: Fabriksteuerungsebene (die Erfassung der gesamten Fabrik), Maschinenebene (Erfassung von Maschinen als Ressource), Elektrokomponentenebene (Erfassung von Einzelkomponenten in einem Gerät) und die Prozessebene (Erfassung von einzelnen Prozessschritten, wie Schneiden). Nur ein solcher Mehrebenenansatz erlaubt die Identifizierung von Energieverlusten ihre Vermeidung durch geeignete Maßnahmen.

Regelkreise wurden für die Fabriksteuerungsebene entwickelt zwecks einer energiesparenden Maschinenbelegung. Für die unteren Ebenen (Maschinenlevel, Elektrokomponentenebene und Prozessebene) wurden spezifische Regelkreise entwickelt, die einen energieeffizienten Betrieb der Maschine unterstützt. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Lage, wählt ein solcher Regelkreis die idealen Maschinenparameter und den Betriebszustand.

Der Ansatz wurde entwickelt, um energieeffiziente Steuerung in allen angegebenen Ebenen und innerhalb der Hierarchie zu ermöglichen. Durch die Nutzung von Konsummuster auf allen Ebenen, können Vorhersagen für eine optimale Steuerung gemacht werden.

Die Umsetzung dieser Regelkreise erfolgt durch die Anwendung eines speziell angefertigten PPS-Tools (Zentralkomponente der Produktionsplanung und –Steuerung). Dieses wird durch analytische Modellen, um eine ganzheitliche energieoptimale Planung und Steuerung zu verwirklichen.

### 5.5.1 Energiebedarf als weitere Zielgröße

Das Ziel in der Produktionssteuerungsebene, d.h. dem Fabrikebenenregelkreis ist die Identifizierung möglicher Verluste in Fabriken und Prozessperipherien, zum Beispiel unnötige Standby-Zeiten, um Verbesserungsmaßnahmen einzuleiten. Dies wird erreicht durch Energieplanung, die von der detaillierten Planung und Energieüberwachung resultiert, sowie aus einem Vergleich zwischen tatsächlichem Energieverbrauch und prognostiziertem Verbrauch.

Detaillierte Produktionsplanung- und –Steuerungsaufgaben werden durch ECOMATION Planungswerkzeug in sieben Schritten, wie in Bild 5-9 gezeigt, ausgeführt.



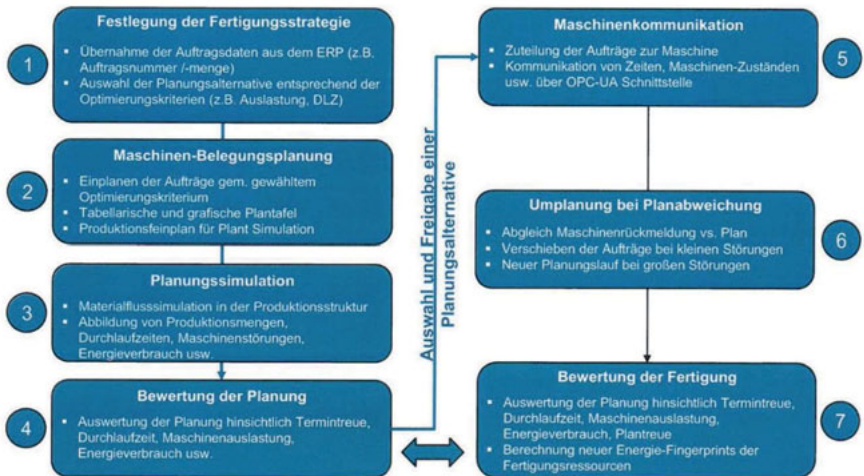


Bild 5-9: Schritte der Produktionsplanung- und -Steuerung

Im ersten Planungsschritt werden die Fertigungsaufträge, die gefertigt werden, vom übergeordneten ERP-System in ein Arbeitsterminierungswerkzeug eingelesen. Letzteres berücksichtigt alle benötigten Bestellungen in einem ausgewählten Zeitraum (beispielsweise für eine Produktionsschicht). Darüber hinaus wird die Produktionsstrategie ausgewählt. Die Produktionsstrategie spiegelt die Zielgrößen, die optimiert werden müssen, wie z.B. kurze Lieferzeit, hohe Maschinenauslastung, niedrige Zwischenbestände oder hohe Energieeffizienz. Im zweiten Schritt, bezogen auf die gewählte Produktionsstrategie, erstellt das Planungswerkzeug ein Maschinenplan unter Berücksichtigung aller Zielprioritäten. Die Arbeiten werden an die verfügbaren Produktionsmittel unter Verwendung eines Zeitplanungs-Algorithmus verteilt. Im dritten Schritt greift ECOMATION Planungstool auf eine Informationstechnik für Simulationen von Produktionssystemen zurück, um die wei-

tere Detaillierung zu erlauben. Vor der Serienfreigabe, wird die Produktionsstruktur, dargestellt in der Simulation, verwendet, um zu überprüfen, welche Materialflüsse für den erzeugten Produktionsplanungsvorschlag notwendig sind. Die Simulation bietet Prognosedaten über die zu erwartenden Produktionslaufzeiten, die Zwischenbestände (in Arbeit), sowie der zu erwartende Energieverbrauch. Am Ende werden die repräsentierenden Indikatoren Zeit, Qualität, Kosten und Energie in einem so genannten KPI-Cockpit im Planungstool angezeigt, die die Basis für die Bewertung bereitstellen. Die Evaluierung zielt auf Erzeugungsoptimierung auf Grundlage der Faktoren Zeit, Kosten, Qualität und Energie ab. Der Kostenfaktor beispielsweise ist in den Ausrüstungskosten reflektiert. Die Energiekosten, die Teil des Maschinenstundensatzes sind, kann so flexibel sein. Einerseits hängen sie von der Referenzzeit ab und andererseits von einem verbrauchsabhängigen Leistungspreis. Außerdem wird der Stromverbrauch sowohl über die Zeit dargestellt als auch über den zugewiesenen jeweiligen Produktionsressourcen und hergestellten Produkten. Der Planungsvorschlag kann zwischengespeichert werden und ein neuer Planungslauf geschaffen werden, was die veränderte Optimierungskriterien reflektiert. Eine zusätzliche monetäre Bewertung der Planungsvorschläge erlaubt die Auswahl der wirtschaftlichsten Alternativen durch die Produktionsplaner. Somit stellt ECOMATION eine Methodik für modellbasierte Planung und Auswertung von Energieeffizienz für Bearbeitungsprozesse zur Verfügung. Der Planungsvorschlag stützt sich auf die Fertigung durch die Freigabe der ausgewählten Planungsalternativen. Wie die Kommunikation zwischen Planungs- und Produktionsgebäuden über OPC - UA Standard funktioniert, wird im nächsten Kapitel beschrieben. Während der laufenden Produktion, werden die aktuellen Maschinenzustände und Betriebsdaten sowie fertiggemeldete Produktionsmengen an die die Planungs-

und Steuerungskomponente des Tools zurückgemeldet. Diese hält den Fortschritt in Zeit und Menge fest und vergleicht ihn mit dem Plan und ermöglicht im Falle von Planabweichungen Eingriffe. Weil solche Planabweichungen nicht ungewöhnlich in der realen Welt der Herstellung sind, sind Steuerungseingriffe in den laufenden Planungsprozess oft nötig. Hier sind zwei Arten von Zwischenfällen bei der Herstellung Prozesses unterschieden. Ein kleiner Zwischenfall, wie beispielsweise die Abweichung der realen von der vorgegebenen Bearbeitungszeit, führt nur zu einem Aufschub in der Fertigungsauftragssequenz, sofern es die Planungsreserve ermöglicht. Wenn die Planaufträge verschoben werden können, oder wenn eine erhebliche Störung in der Produktionsstätte eintritt, wie beispielsweise ein Maschinenausfall, kann ein neuer Planungslauf in dem Auftragsplanungswerkzeug, das auf dem aktuellen Arbeitsstand basiert, eingeleitet werden.

### **5.5.2 Fingerprints inkl. Anpassung**

Im letzten Verfahrensschritt des abgebildeten Prozesses, werden Energieprofile (Fingerabdrücke) für alle eingesetzten Produktionsmittel, basierend auf den Fertigungsdaten, die zurückgemeldet wurden, berechnet. Fingerabdrücke sind Profile des Energieverbrauchs jeder Maschine, weiter differenziert nach Zustand, Material, Produkt, Werkzeug, Produktionsprogramm und Auftrag. Daher sind die Fingerabdrücke an den tatsächlichen Energieverbräuchen der Fabrik, nach den jeweiligen Betriebsbedingungen, untergebracht. Zu diesem Zweck werden die aufgezeichneten Energieverbrauchs- werte den Maschinenzuständen zugeordnet, um einen durchschnittlichen Wert für zukünftige Planungsläufe zu bestimmen.

Das regelmäßige Feedback der tatsächlichen Produktionsdaten und deren Vergleich mit Original- Planungsdaten erzeugt einen Regelkreis, welcher kontinuierlich die Daten, die zur Planung genutzt werden, verbessert.

Ein lernender Planungsprozess wird so geschaffen, der sowohl die Änderungen der Produktionsbedingungen (deterministische und unvorhergesehene) besser bewältigt als auch die Vorhersagen der Planungsmodelle kontinuierlich verbessert.

### 5.5.3 Messaging System und VDI 5600 Blatt 3

Zur Anbindung der Energieverbrauchssteuerung auf Produktionssteuerungsebene an die Energieverbrauchssteuerung auf Steuerungsebene sind netzwerkfähige und betriebssystemunabhängige Protokolle wie OPC UA oder auch das Simple Object Access Protocol (SOAP) zum Aufbau eines Messaging Systems zu verwenden. Für die Kommunikation zwischen der Planungsebene und der Maschinensteuerung wurde auf den VDI (Verein Deutscher Ingenieure)-Standard zur MES (Manufacturing Execution System)-Kommunikation zurückgegriffen. Die Nutzung des VDI-Standards erlaubt es, die im Rahmen des Projekts entwickelten Lösungen schneller in den Markt zu überführen.

Ein weiterer Grund für die Anwendung des Standards gemäß Richtlinie ist es, herstellernerutral zu bleiben. Dieser Anspruch muss auch für die Kommunikation gelten. Aus diesem Grund wurde OPC UA gewählt. Das Format der OPC Foundation genießt eine hohe Akzeptanz und ist weit verbreitet in der Industrie. Zentrale Gründe liegen in der Offenheit, Unabhängigkeit und Vollständigkeit des Standards. Darüber hinaus ermöglicht die Server-Client-Architektur eine schnelle und stabile Umsetzung der Projektanforderungen.

Die Bild 5-10 skizziert die geplante Kommunikation zwischen den Planungs- und Steuerungsebenen innerhalb von ECOMATION.

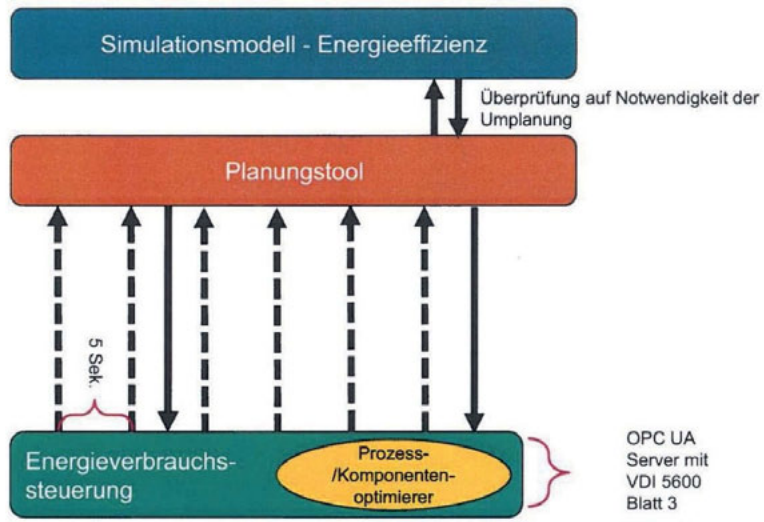


Bild 5-10: Kommunikation zwischen Planungs- und Steuerungsebenen

Basierend auf der gewählten Methodik, der Kommunikationsarchitektur (OPC UA) und dem Standard für den Datenaustausch gemäß VDI 3600, war ECOMATION in der Lage, ein Planungs- und Steuerungsinstrument zu schaffen, um folgende fünf Funktionen zu erfüllen:

- Anwendung eines Planungsalgorithmus, um die energieeffiziente Produktionsplanung und termingerechte Zuordnung von Produktionsaufträgen auf Maschinen zu ermöglichen. Weitere Optimierungsfaktoren bei der Planung und Terminierung, die sogenannten logistischen Zielgrößen, sind ebenfalls berücksichtigt: Liefertreue, Auftragslage, Anlagenauslastung und Durchlaufzeit.

- Standardisierte Steuerung der entsprechenden Maschinen. Durch die Verwendung der OPC UA-Schnittstelle und des einheitlichen Kommunikationsstandards, auf Basis der VDI-Richtlinie, nutzt ECOMATION ein einheitliches und maschinenunabhängiges Kommunikationsverfahren.
- Integration von Rückkopplungsdaten aus der laufenden Fertigung (Verspätungen, Maschinenstörung, etc.), um den Produktionsplan entsprechend anzupassen. Kleinere Verzögerungen werden bei ggf. bestehenden zeitlichen Planungspuffern steuernd berücksichtigt, wohingegen größere Störungen zu einem erneuten Anstoß des Planungsalgorithmus führen, um bei veränderten Rahmenbedingungen die Energieeffizienz des Produktionssystems (beispielsweise durch veränderte Lastverteilung auf den Maschinen) zu gewährleisten.
- Permanente Neuberechnung der energetischen Fingerabdrücke zur Anpassung der als Planungsgröße verwendeten Energieeffizienz der Produktionsanlagen. Der Energieverbrauch einer Maschine kann sich aufgrund vieler Faktoren ändern (z.B. durch Werkzeugverschleiß). Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse werden die Energie-Verbrauchssparameter ständig auf Basis der Maschinenrückmeldung überprüft und angepasst, um das Planungsmodell schrittweise zu verbessern.
- Die Berechnung der Produktionskennzahlen (KPIs) in Echtzeit, berücksichtigt ECOMATION nicht nur technische (Energieverbrauch), sondern auch finanzielle Aspekte (Energiekosten des gewählten Produktionsplans).

---

## 6 Framework zur Energiebedarfsoptimalen Ansteuerung

### 6.1 Aufgaben des Framework zur energieoptimalen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

Das Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen soll im Wesentlichen vier funktionale Anforderungen erfüllen, bei deren Realisierung nichtfunktionale Anforderungen berücksichtigt werden müssen. Die vier funktionalen Anforderungen sind:

1. Um einem Energieoptimierer die Möglichkeit zu geben, Vorschläge für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschine zu machen, muss dieser über eine Schnittstelle mit den energetisch relevanten Informationen oder zumindest mit dem energetischen Istzustand der Werkzeugmaschine sowie der Komponenten versorgt werden. Die Bereitstellung des von den Energieoptimierern benötigten energetischen Istzustandes aus NC, SPS oder direkt aus den Komponenten stellt damit die erste Anforderung an das Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen dar.
2. Da es sich bei den Energieoptimierern nicht um abgeschlossene Systeme handelt, sondern diese durch externe Vorgaben z.B. vom MES oder Maschinenbediener zur Laufzeit oder auch schon bei der Initialisierung parametrisiert werden können, muss das Framework zur Vor-

- gabe der Führungsgrößen sowie zur Überwachung ebenfalls Schnittstellen zur Verfügung stellen. Dies bildet die zweite Anforderung an das Framework.
3. Außerdem benötigt jeder Energieoptimierer entsprechend seiner Komplexität, Zykluszeit und Implementierung eine bestimmte Menge an Systemressourcen wie Speicher und Rechenzeit. Deren Umfang muss dem Framework mitgeteilt werden, damit dieses die entsprechenden Ressourcen vorhalten kann. Auch hierfür muss das Framework Schnittstellen bereitstellen, um dem Optimierer die Möglichkeit zu bieten, diesen Ressourcenbedarf zu kommunizieren. Letztendlich muss das Framework Einstiegspunkte für den Programmcode des Energieoptimierers vorgeben, um eine Ausführung zu erlauben. Diese Einstiegspunkte müssen definiert sein und dann durch das Framework genutzt werden. Die Einbindung der Energieoptimierer stellt damit die dritte Anforderung an das Framework da.
  4. Weiterhin soll ein Energieoptimierer den Zustand der Werkzeugmaschine bzw. deren Komponenten beeinflussen können. Hierfür sind Schnittstellen zur SPS, NC oder direkt zu den Komponenten notwendig, um die im entsprechenden Kapitel definierten Stelleingriffe zur Energieverbrauchsbeeinflussung zu nutzen. Hierbei handelt es sich um die vierte und letzte Anforderung an das Framework.

Aus den Anforderungen lassen sich die in Bild 6-1 dargestellten, benötigten Schnittstellen des Frameworks zu SPS, NC, Komponenten sowie MES und Bedienoberfläche ableiten.



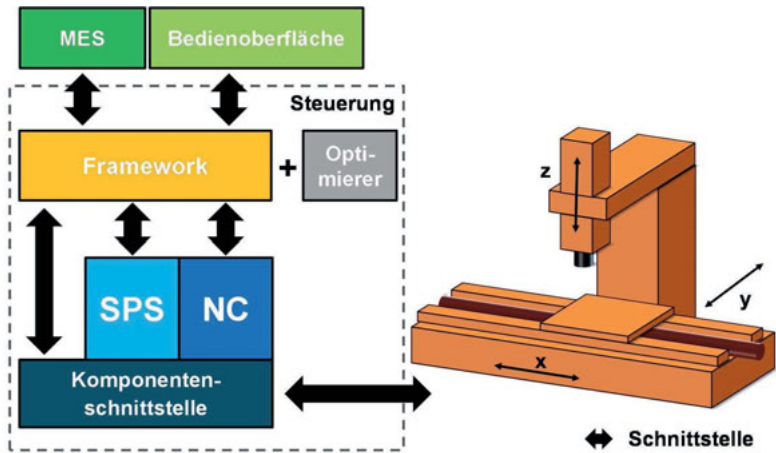


Bild 6-1: Benötigte Schnittstellen des Frameworks zur energieoptimalen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen

## 6.2 Frameworkbasierte Bereitstellung des energetischen Istzustandes

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, existieren unterschiedlichste Möglichkeiten, über EIDL energetisch relevante Informationen oder direkt den Energieverbrauch zur Verfügung zu stellen. So können energetisch relevante Informationen aus der NC bzw. SPS entnommen, direkt von den Komponenten (wie z.B. Achsen) über den Feldbus ausgelesen oder von einem Messgerät erfasst werden. Zur Bereitstellung energetisch relevanter Informationen muss das Framework, wie in Bild 6-2 dargestellt, Erfassungsmodule bereitstellen, die dies erlauben. Erfasste energetisch relevante Informationen müssen unter Umständen in einem Simulationsmodul mit energetischen Modellen gekoppelt werden, um den energetischen Istzustand oder nur den Energieverbrauch an den Energieoptimierer zur Verfügung zu stellen.

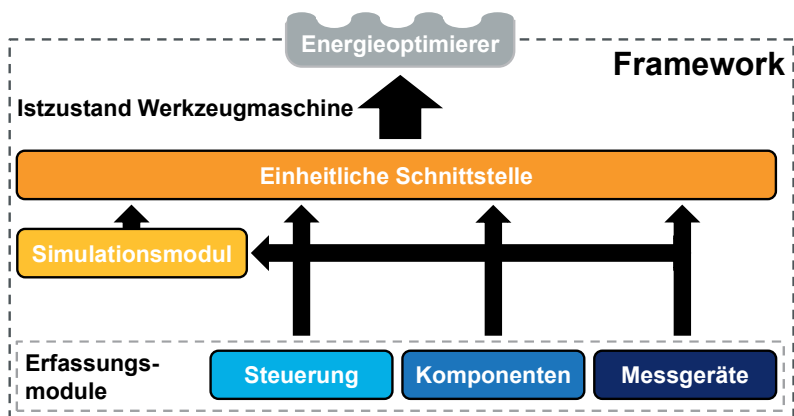


Bild 6-2: Einheitliche Bereitstellung des energetischen Istzustandes

### 6.3 Frameworkbasierte Durchführung von Stelleingriffen

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

Weiterhin existieren in EIDL unterschiedlichste Möglichkeiten Stelleingriffe zur Verfügung zu stellen und darüber den Energieverbrauch zu beeinflussen. Eingriffe können entweder durch Nutzung des Feldbusses direkt in den Komponenten umgesetzt werden, sofern die Komponente über ein Feldbusprofil zur energieoptimalen Ansteuerung verfügt. Als Alternative dazu ist eine Beeinflussung der Komponenten durch die Steuerung möglich. Hierfür müssen die vom Steuerungsprogramm vorgegebenen Sollwerte angepasst bzw. überschrieben werden. Als dritte Möglichkeit, den Energieverbrauch von Komponenten zu beeinflussen, können diese um zusätzliche Hardware erweitert werden, welche dann angesteuert werden kann.

Zur Bereitstellung aller Stelleingriffe muss das Framework, wie in Bild 6-3 dargestellt, Module bereitstellen, die die Möglichkeiten für Stelleingriffe umsetzen.

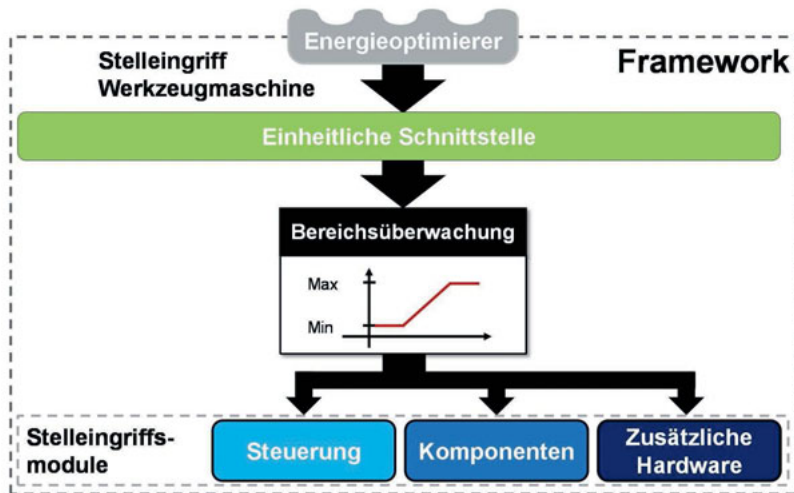


Bild 6-3: Bereitstellung von Stelleingriffen

Des Weiteren muss das Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen gewährleisten, dass keine Vorhaben des Energieoptimierers durchgeführt werden, welche die Komponenten der Werkzeugmaschine beschädigen oder gar zerstören könnten. Hierfür wird für jeden Stelleingriff die Bereichsüberwachung genutzt, um die zulässigen Grenzwerte aus EIDL für jede Komponente einzuhalten.

Um Energieoptimierern einen einheitlichen Zugriff auf die unterschiedlichen Stelleingriffsmodule zu gewährleisten, werden die Stelleingriffe über eine einheitliche Schnittstelle zur Verfügung gestellt. Die einheitliche Schnittstelle abstrahiert die Module für die feldbusbasierten Stelleingriffe auf die Komponenten, die steuerungsbasierten Stelleingriffe auf die Steuerung und die Stelleingriffe, welche zusätzliche Hardware nutzen, um Komponenten zu beeinflussen, und stellt diese einheitlich zur Verfügung.

Durch den Import von EIDL in das Framework stehen Stelleingriffe zur energetischen Beeinflussung der Werkzeugmaschine zur Verfügung. Bereits hierdurch kann über das Framework eine Beeinflussung des Energieverbrauchs der Werkzeugmaschine durchgeführt werden. Hiermit kann die vierte Anforderung an ein Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen erfüllt werden.

### 6.4 Integration der Energieoptimierer in das Framework

*J. Schlechtendahl, Ph. Eberspächer, A. Verl*

Damit eine Integration von Energieoptimierern in das Framework zur energieoptimalen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen erfolgen kann, muss ein Rahmen oder auch Template für Energieoptimierer existieren. Dieser Rahmen legt fest, wie die Energieoptimierer integriert und ausgeführt werden können.

Die Anforderungen von Energieoptimierern an den Rahmen sind zum einen, dass Energieoptimierer unabhängig vom Rest des Frameworks entwickelt und genutzt werden können, zum zweiten, dass das Know-How, welches in Energieoptimierern existiert, nicht einsehbar ist, d.h. geschützt ist, und zum dritten, dass sie eine hohe Performanz besitzen – also im Millisekundentakt Optimierungsvorschläge liefern. Weiterhin wäre es von Vorteil, wenn die Energieoptimierer ohne großen zusätzlichen Entwicklungsaufwand direkt aus Entwicklungstools wie z.B. Matlab Simulink oder Mathematica exportiert werden könnten.

Als mögliche Rahmen kommen statistische und dynamische Programmbibliotheken sowie Webservices in Betracht. Bei Programmbibliotheken han-

delt es sich um lokal vorhandene Funktionen, Prozeduren oder Unterprogramme, die Funktionalität zur Lösung einer Problemstellung bereitstellen. Im Gegensatz dazu sind Webservices Softwareanwendungen, die diese Funktionalität über Netzwerkschnittstellen zur Verfügung stellen.

Statische Programmbibliotheken bieten den Vorteil, dass sie eine hohe Performanz besitzen und unabhängig vom Framework entwickelt und genutzt werden könnten. Allerdings ist der Quellcode von statischen Programmbibliotheken meist einsehbar und muss bei der Kompilierung des Frameworks durch den Linker zu diesem hinzugefügt werden.

Dynamische Programmbibliotheken bieten die Vorteile von statischen Programmbibliotheken. Außerdem ist der Quellcode von dynamischen Programmbibliotheken nicht einsehbar und das Hinzufügen zum Framework kann erst zur Laufzeit erfolgen. Auch ein direkter Export aus einigen Entwicklungstools wie Matlab Simulink oder Mathematica, z.B. als dynamische Programmbibliothek für Windows in Form einer Dynamic Link Library (DLL), ist möglich.

Webservices können ebenfalls unabhängig vom Framework entwickelt und genutzt werden. Das in den Energieoptimierern vorhandene Know-How ist nicht verfügbar. Lediglich die Schnittstellen der Energieoptimierer werden über maschinenlesbare Beschreibungen publiziert. Ein Nachteil der Webservices besteht in der Anbindung über Netzwerkschnittstellen, wodurch die geforderte Performanz nicht erreicht werden kann. Auch eine Bereitstellung von Webservices aus Entwicklungstools für Energieoptimierer ist heute nicht bekannt.

Aufgrund dieser noch einmal in Tabelle 6-1 dargestellten Bewertung wurde entschieden, Energieoptimierer in Form einer dynamischen Programmbibliothek zu realisieren.

Tabelle 6-1: Bewertung von Rahmen für Energieoptimierer

Anforderung an Rahmen für Energieoptimierer	Statische Programmbibliotheken	Dynamische Programmbibliotheken	Webservices
Entwicklung und Nutzung unabhängig vom Framework	✓	✓	✓
Schutz des Energieoptimierer Know-Hows	✗	✓	✓
Hohe Performanz	✓	✓	✗
Unterstützung durch Entwicklungstools	✗	✓	✗

6.4.1 Schnittstellen der Energieoptimierer

Um einen Energieoptimierer in Form einer nachladbaren Programmbibliothek in das Framework integrieren zu können, wird eine Beschreibung der Schnittstellen sowie ein Treiber für den Energieoptimierer benötigt. Damit ein Energieoptimierer einen Vorschlag zur Energieoptimierung machen kann, benötigt er über Schnittstellen Informationen über den aktuellen Istzustand der zu optimierenden Komponenten oder ggf. der gesamten Werkzeugmaschine. Weiterhin werden Schnittstellen benötigt, damit der Optimierer überwacht bzw. die Führungsgrößen beeinflusst werden können, sowie Schnittstellen, über die der Energieoptimierer den Vorschlag zur Energieoptimierung ausgeben kann. Um eine Energieoptimierung zu ermöglichen,

muss der Energieoptimierer weiterhin über Schnittstellen bzw. Einstiegspunkte verfügen, über die er initialisiert, ausgeführt und beendet werden kann.

Da der Programmcode des Energieoptimierers neben dem Werkzeugmaschinenbauer auch von Drittanbietern stammen kann, ist dieser dem Framework nicht bekannt und wird während der Ausführung folglich auch nicht neu erzeugt. Um den Energieoptimierer trotzdem an unterschiedliche Nutzungsszenarien anpassen zu können, wird eine Schnittstelle zum Laden einer externen Konfigurationsdatei benötigt. Der Inhalt, Syntax und Umfang der Konfigurationsdatei kann dabei beliebig durch den Hersteller des Energieoptimierers definiert werden und ist nicht durch das Framework vorgegeben. Zum Laden der Konfigurationsdatei wird lediglich der Pfad dieser Konfigurationsdatei an den Energieoptimierer übergeben, so dass dieser interne Anpassungen vornehmen kann.

Alle Schnittstellen eines Energieoptimierers sind noch einmal in Bild 6-4 dargestellt, wobei die Schnittstellen zur Vorgabe von Führungsgrößen und zur Überwachung im Folgenden als Parameter eines Energieoptimierers zusammengefasst werden.

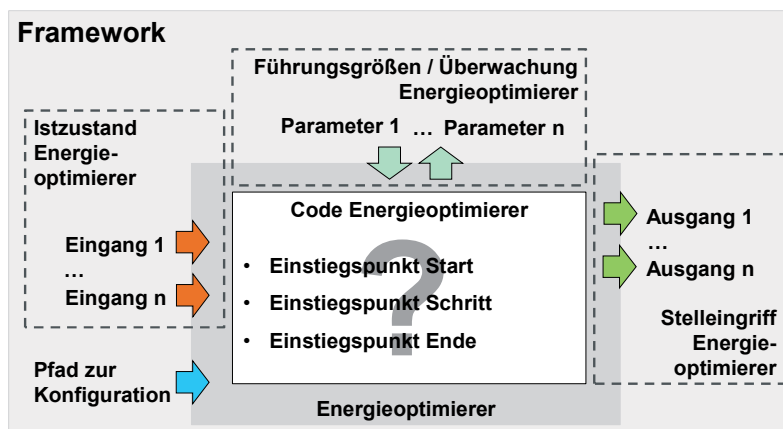


Bild 6-4: Schnittstellenbeschreibung der Energieoptimierer

Damit die Schnittstellen der Energieoptimierer automatisch durch Programmcode im Framework angelegt werden können, wurde eine Optimiererbeschreibungssprache definiert, aus der eine Optimiererbeschreibungsdatei abgeleitet werden kann. Die Optimiererbeschreibungssprache gibt dabei die Form vor, in der die Schnittstellen des Optimierers in der Optimiererbeschreibungsdatei beschrieben werden müssen.

Zur Definition der Optimiererbeschreibungssprache wurde auf Basis von XML ein Schema realisiert, welches die Strukturierung der Schnittstellen in Eingänge (Istzustand), Parameter (Führungsgrößen / Überwachung), Ausgänge (Stelleingriff) und Konfiguration festlegt. Der Aufbau der Optimiererbeschreibungssprache ist in Bild 6-5 als Optimierermodell dargestellt.



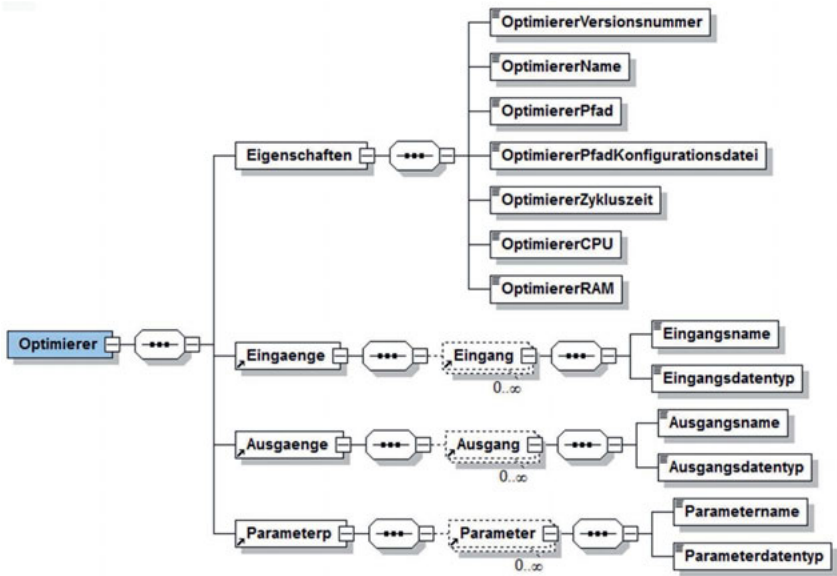


Bild 6-5: Aufbau Optimierermodell

Unter dem Hauptknoten „Optimierer“ befinden sich zur allgemeinen Beschreibung des Energieoptimierers Eigenschaften wie die Versionsnummer, der Namen sowie der Pfad und Informationen zu dessen Ausführung (z.B. benötigter „Random-Access Memory“ (RAM), benötigte „Central Processing Unit“ (CPU) und Zykluszeit). Unter den Subknoten „Eingaenge“, „Ausgaenge“ und „Parameterp“ kann jeweils eine beliebige Anzahl an entsprechenden Größen existieren. Jede Größe wird dabei durch einen Namen und einen Typ, welcher eindeutig den Datentyp kennzeichnet, festgelegt.

Darüber hinaus müssen von jedem Energieoptimierer drei definierte Einstiegspunkte bereitgestellt werden. Der erste Einstiegspunkt „Start“ wird durch den Treiber angesprochen, wenn der Energieoptimierer im Framework initialisiert wird; der zweite Einstiegspunkt „Schritt“ wird zyklisch nach dem

Starten des Energieoptimierer abhängig von der Zykluszeit aufgerufen und der dritte Einstiegspunkt „Ende“ wird bei der Beendigung des Energieoptimierers angewählt.

Hinter jedem Einstiegspunkt befindet sich eine optimiererspezifische Funktionalität, die durch den Entwickler des Energieoptimierers frei definiert werden kann. Einzige Randbedingung ist, dass der Energieoptimierer die eigenen Vorgaben bezüglich RAM- und CPU-Nutzung einhält sowie spätestens nach Ablauf der Zykluszeit terminiert. Nur so kann vom Framework gewährleistet werden, dass die Hardwarekapazitäten der Steuerung ausreichen und das Echtzeitverhalten der Steuerung nicht verletzt wird.

### **6.4.2 Anbindung an die Werkzeugmaschine und Konfiguration der Energieoptimierer**

Um den Energieoptimierer mit der Werkzeugmaschine zu nutzen, müssen, wie in Bild 6-6 beschrieben, der Istzustand des Energieoptimierer mit dem globalen energetischen Istzustand der Werkzeugmaschine verknüpft werden. Der energetische Istzustand der Werkzeugmaschine wird für das Framework durch EIDL erfassbar. Weiterhin müssen die Stelleingriffe des Energieoptimierers mit den globalen Stelleingriffen der Werkzeugmaschine, welche ebenfalls in EIDL definiert sind, gekoppelt werden.

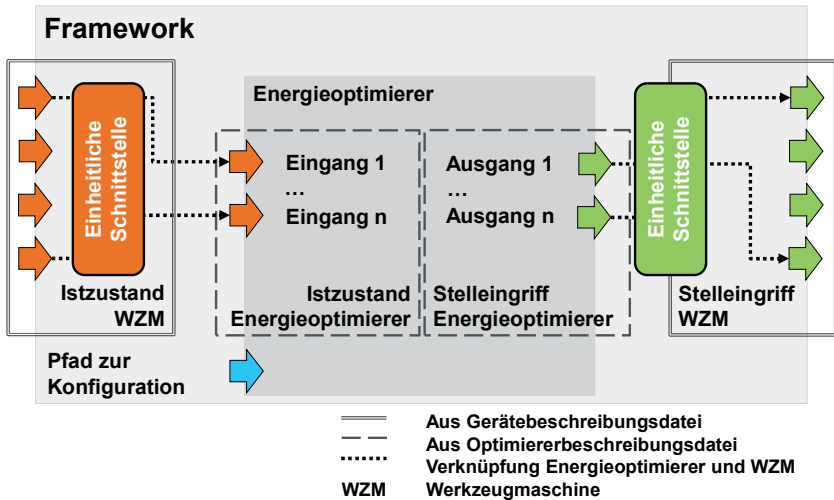


Bild 6-6: Verknüpfung Energieoptimierer und Werkzeugmaschine

### 6.4.3 Ausführung der Energieoptimierer

Zur Ausführung der Energieoptimierer stehen die drei Einstiegspunkte „Start“, „Schritt“ und „Ende“ in jedem Energieoptimierer zur Verfügung. Nach dem Laden der einzelnen Optimierer wird jeweils der Einstiegspunkt „Start“ angewählt und der Optimierer damit initialisiert.

Anschließend kann die Optimierung des Energieverbrauchs durch die einzelnen Energieoptimierer durchgeführt werden. Hierfür werden zu Beginn jedes Zyklus vom Framework alle in diesem Zyklus auszuführenden Energieoptimierer anhand der in der Optimiererbeschreibungsdatei definierten Zykluszeit bestimmt. Anschließend werden für die auszuführenden Energieoptimierer, wie in Bild 6-7 beschrieben, die Istzustände von der Werkzeugmaschine abgerufen. Nach diesem Schritt liegen wieder aktuelle Werte für

Istzustände an den Energieoptimierern an. Als zweiter Schritt wird für jeden Energieoptimierer die Schrittfunktion ausgeführt, um die Optimierung durchzuführen. Als Ergebnis dieser Schrittfunktion wurden von den Energieoptimierern die Vorschläge für Stelleingriffe („StelleingriffeOptimizer“) an das Framework zurückgegeben. Diese können dann in einem letzten Schritt nach der Prüfung durch das Framework über die Stelleingriffe der Werkzeugmaschine gesetzt werden.

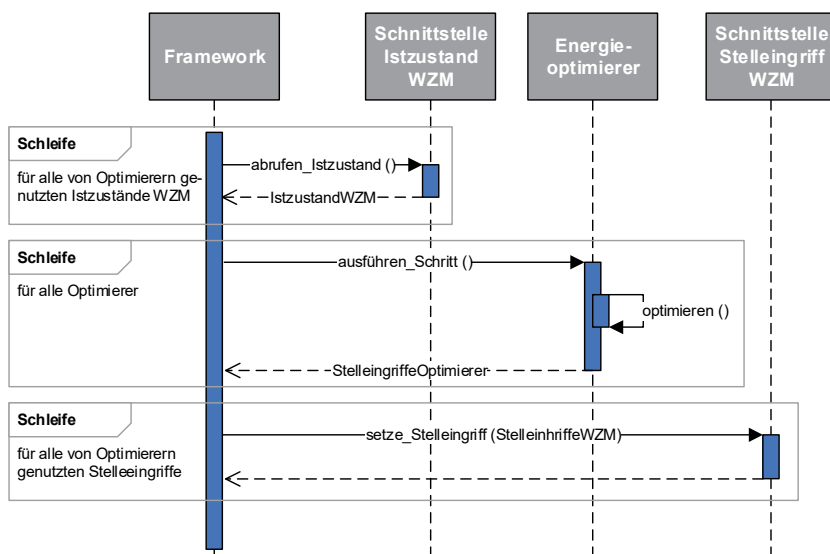


Bild 6-7: Sequenzdiagramm Ausführung Energieoptimierer

Wird die Energieoptimierung beendet und der Energieoptimierer aus dem Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen entfernt, wird der Einstiegspunkt „Ende“ angewählt. Hierdurch können durch den Energieoptimierer unter Umständen belegte Ressourcen (wie zum Beispiel Speicher) wieder freigegeben werden.

Durch die Möglichkeit, Energieoptimierer in das Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen einzubinden und auszuführen, konnte die dritte Anforderung an das Framework erfüllt werden.

## **6.5 Beeinflussung und Überwachung von Energieoptimierern zur Laufzeit**

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

Werden Energieoptimierer ausgeführt und sind sie sowohl mit dem energetischen Istzustand als auch mit den Stelleingriffen der Werkzeugmaschine verbunden, fehlen Möglichkeiten, um Führungsgrößen vorzugeben und die Energieoptimierer zu überwachen. Dies ist vor allem bei sich ändernden Produktionsbedingungen relevant, auf die reagiert werden muss. Hierfür wird eine Schnittstelle benötigt, um die Führungsgrößen zu beeinflussen und die daraus resultierenden Handlungen der Energieoptimierer zu überwachen. Ein Energieoptimierer interagiert bei seiner Ausführung entweder mit dem Maschinenbediener oder einem übergeordneten MES. Für beide Anwendungsfälle muss im Framework eine Schnittstelle existieren.

### **6.5.1 Vorgabe von Führungsgrößen und Überwachung durch den Maschinenbediener**

Für die Vorgabe von Führungsgrößen und die Überwachung durch den Maschinenbediener soll im Rahmen dieser Arbeit ein Kommunikationsprotokoll genutzt werden, welches eine betriebssystemunabhängige sowie netzwerkfähige Kommunikation bietet. Als Protokolle könnten bspw. OPC UA oder auch das Simple Object Access Protocol (SOAP) genutzt werden.

Zur Nutzung der Kommunikationsprotokolle wurde, wie in Bild 6-8 dargestellt, im Framework ein Kommunikationsserver integriert. Beim Laden der Optimiererbeschreibungsdatei werden die Parameter (zur Führungsgrößenvorgabe und Überwachung) als entsprechende Datenpunkte im Kommunikationsserver angelegt und mit den Parametern des Energieoptimierers verknüpft. Durch die Erstellung einer Bedienoberfläche mit Kommunikationsschnittstelle zum Kommunikationsserver oder durch Nutzung eines frei verfügbaren Kommunikationsclients kann dann der Energieoptimierer durch den Maschinenbediener sowohl überwacht als auch beeinflusst werden.

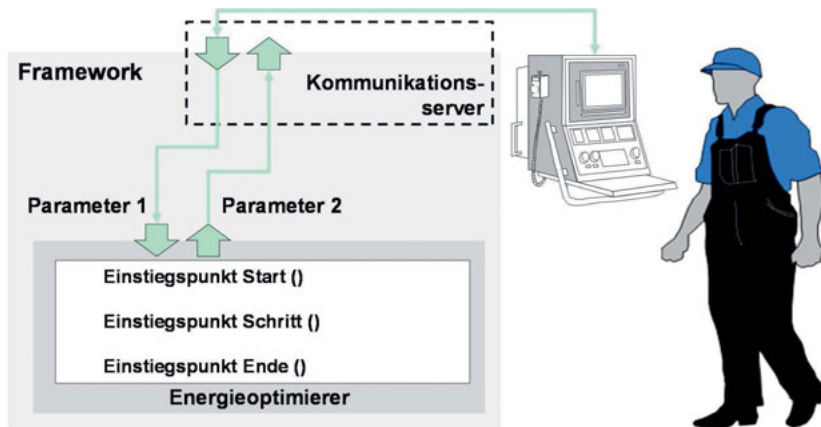


Bild 6-8: Führungsgrößenvorgabe und Überwachung durch den Maschinenbediener

### 6.5.2 Vorgabe von Führungsgrößen und Überwachung durch das MES

Die Anbindung an die übergeordnete Ebene (MES) einer Werkzeugmaschine erfolgt ebenfalls über den Kommunikationsserver. Der einzige Unterschied zur Schnittstelle für den Maschinenbediener besteht darin, dass die Bezeichnung der Datenpunkte nicht frei wählbar ist. Mit VDI Richtlinie

5600 Blatt 3 existiert eine praxisnahe Definition der Schnittstelle zwischen MES und Werkzeugmaschine bzw. Anlage. Durch die Definition ist eine Struktur für die MES-Schnittstelle vorgegeben sowie eine Beschreibung von Datenpunkten vorhanden, die sich im Kommunikationsserver abbilden lassen. Die Struktur sowie die Datenpunkte sollen die Basis für die Anbindung des MES bilden.

Damit ein Parameter des Energieoptimierers automatisch durch das MES genutzt werden kann, muss dieser in der Optimiererbeschreibungsdatei ebenfalls angemeldet werden. Der Name des Parameters sowie der Datentyp ist dabei in der Optimiererbeschreibungsdatei analog zu den Datenpunkten in VDI 5600 Blatt 3 zu halten. In Bild 6-9 ist bspw. der Parameter `Arbeitsvorgang_ID` aus VDI 5600 Blatt 3 beschrieben. Ist die `Arbeitsvorgang_ID` für einen Energieoptimierer relevant, so muss er diese als „`b_b_a_d_a_Arbeitsvorgang_ID`“ in der Optimiererbeschreibungsdatei als Parameter bekannt geben. Das Framework erzeugt dann hierauf basierend einen Datenpunkt im Kommunikationsserver.

<b>Datenpunktname</b>	<b>b_b_a_d_a_Arbeitsvorgang_ID</b>	<b>M</b>	<b>String</b>
<b>Erläuterung</b>	<b>Eindeutiger alphanumerische Bezeichner</b>		
<b>Pfad in Schnittstelle</b>	VDI_Maschinenschnittstelle\b_Produktionsauftrag\ b_b_Produktionsauftragsvorgaben\b_b_a_Arbeitsplan\ b_b_a_d_Arbeitsvorgaenge\b_b_a_d_a_Arbeitsvorgang_ID		
<b>Beispiel</b>	UUID – ISO/IEC 9834-8:2005, GUID		

Bild 6-9: Beispiel VDI 5600 Blatt 3 `Arbeitsvorgang_ID`

Im Rahmen der Prüfung der VDI Richtlinie 5600 Blatt 3 bezüglich der Nutzung im Framework für die energieoptimale Ansteuerung konnten Daten-

punkte identifiziert werden, welche besonders relevant erscheinen, um Führungsgrößen vorzugeben bzw. den Ablauf in der Werkzeugmaschine zu überwachen. Diese Datenpunkte befinden sich in der VDI Richtlinie unter den Kategorien „Produkt“, „Produktionsauftrag“, „Prozess“, „Ressource“ und „Allgemeiner Datenpunkt“. Das Konzept wie die Datenpunkte der VDI Richtlinien auf potentielle für Energieoptimierer relevante Parameter abgebildet werden können, ist im Folgenden dargestellt:

### **Produkt**

Um der Werkzeugmaschinensteuerung mitzuteilen, welche Produkte auf der Werkzeugmaschine gefertigt werden sollen und mit welchem Bearbeitungsprogramm dies erfolgen soll, bieten sich a\_a\_a\_Produkt\_ID und a\_a\_g\_a\_Bearbeitungsprogramm\_ID als Führungsgrößen an. Zur Überwachung des Bearbeitungsstands des Produkts sowie des Qualitätsstatus können die unter a\_b\_Produktstatus definierten Datenpunkte genutzt werden.

### **Produktionsauftrag**

Über die Produktionsauftragsbeschreibung (b\_a\_Produktionsauftragsbeschreibung) sowie die Produktionsauftragsvorgaben (b\_b\_Produktionsauftragsvorgaben) kann die Werkzeugmaschinensteuerung über die anstehenden Aufträge informiert werden. Stehen keine Aufträge an, kann die Werkzeugmaschine zum Beispiel über einen Zustandsoptimierer abgeschaltet werden. Durch die Überwachung der Produktionsauftragsergebnisse (b\_c\_Produktionsauftragsergebnisse) kann der Istzustand der Werkzeugmaschine vom MES erfasst werden.



## Prozess

Durch die Führungsgrößen unter Prozessparametervorgabe (c\_d\_\_Prozessparameter\_Vorgaben) können Vorgaben an die Werkzeugmaschine übertragen werden, welche auch für prozessspezifische Optimierer relevant sein können. Die Überwachung kann dann entweder über die Prozessmeldung (c\_c\_\_Prozessmeldung) oder detaillierter über die Prozessparameterergebnisse (c\_e\_\_Prozessparameter\_Ergebnisse) erfolgen.

## Ressourcen

Durch die Ressourcenvorgabe (d\_f\_\_Ressourcenvorgaben) kann die Werkzeugmaschine direkt energetisch beeinflusst werden, um zum Beispiel eine Pause vorzugeben, während der Komponenten oder die komplette Werkzeugmaschine abgeschaltet werden. Zur Überwachung der Werkzeugmaschine können Ressourcenmeldungen (d\_e\_\_Ressourcenmeldung), um z.B. einen vom Energieoptimierer selbstständig angewählten Ruhezustand zu übertragen, genutzt werden.

## Allgemeiner Datenpunkt

Zur Vorgabe weiterer Führungsgrößen an die Werkzeugmaschine sowie zu ihrer Überwachung stehen noch zwei Container zur Verfügung. Durch die Datenpunktvorgabe (f\_c\_\_Allgemeiner\_Datenpunkt\_Vorgaben) können in VDI 5600 Blatt 3 nicht beschriebene Vorgänge durchgeführt werden. Für den Rückkanal steht mit den Datenpunktergebnis-

sen (`f_d_Allgemeiner_Datenpunkt_Ergebnisse`) ein weiterer Container zur Verfügung, über den zum Beispiel, der Energieverbrauch an das MES übertragen werden kann.

Durch die Möglichkeiten, sowohl Führungsgrößen über Datenpunkte vorzugeben als auch die Überwachung von Energieoptimierern über Datenpunkte durch den Maschinenbediener wie auch durch das MES bereitzustellen, kann auch die dritte Anforderung an ein Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen erfüllt werden.

### 6.6 Zusammenfassung

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

In diesem Kapitel wurde gezeigt, wie ein Framework aussehen kann, das die Anbindung des energetischen Istzustandes der Werkzeugmaschine sowie die Ankopplung der Stelleingriffe über eine einheitliche Schnittstelle übernimmt. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Energieoptimierer einzubinden, auszuführen sowie zur Laufzeit zu überwachen und zu beeinflussen (bzw. Führungsgrößen vorzugeben). Daraus ergibt sich der in Bild 6-10 dargestellte Gesamtaufbau des Frameworks für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen.

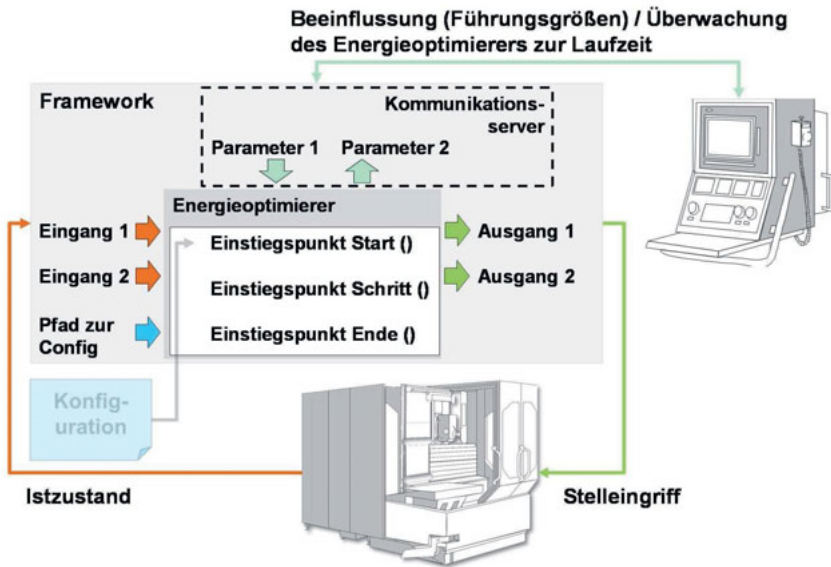


Bild 6-10: Gesamtstruktur Framework für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen

Um einen Energieoptimierer für den Energieverbrauch an die Werkzeugmaschine anzubinden, sind lediglich die Erstellung der Optimiererbeschreibungsdatei sowie die Verknüpfung mit den Werkzeugmaschinensignalen notwendig. Eine aufwendige Anpassung der Steuerungstechnik kann damit entfallen. Eine Energieoptimierung kann hierdurch kostengünstig realisiert werden.



## 7 ECOMATION Demonstrator

### 7.1 Überblick Optimierungsebene und Anwendungsfälle

*S. Wahren, E. Colangelo, Th. Bauernhansl*

Zusammenfassend betrachtet umfasst ECOMATION, wie in Bild 7-1 dargestellt, drei Optimierungsebenen:

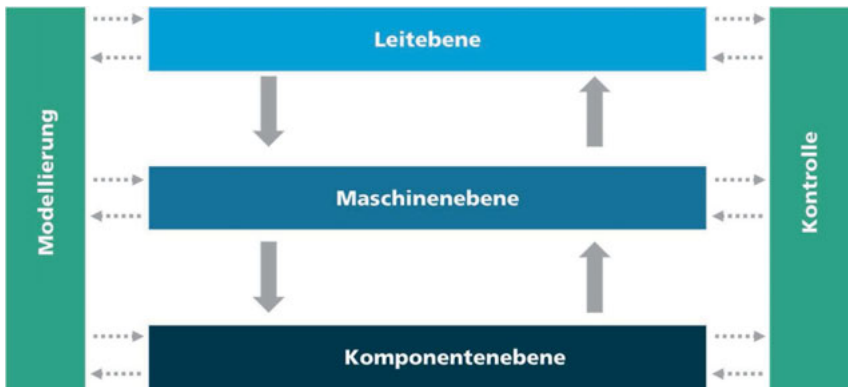


Bild 7-1: Optimierungsebene in ECOMATION

Zur Bewertung aller Ebenen wurde ein beispielhafter Anwendungsfall definiert, dessen Komplexitätsgrad die folgenden Anforderungen erfüllen muss:

- Möglichkeit zur Kombination von automatisierten Prozessen (z.B.: Fräsen) mit manuellen (z.B.: Montagestation) zur Nachbildung einer Serienfertigung

- Abbildung von Anforderungen einer mehrstufigen diskreten Fertigung
- Integration unterschiedlicher Maschinen und Maschinentypen (als Einzel und Poolkapazität) sowie Berücksichtigung der individuellen Fingerprints und ihrer Gewichtung gegenüber konventionellen Planungskriterien der Produktionsplanung
- Abbildung und Synchronisation verzweigter Materialflüsse entsprechend einer konvergierenden Fertigung
- Darstellung einer hinreichenden Komplexität, um die planungsrelevanten Fragestellungen realitätsnah abzubilden, bei gleichzeitiger Abstrahierbarkeit des Anwendungsfalls um diesen auf anderweitige Fertigungsumgebungen übertragen zu können
- Schaffung einer Möglichkeit zur Erstellung verschiedener Planungsalternativen und Durchführung von Vergleichsanalysen

Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde der Anwendungsfall unter Erfüllung der folgenden Merkmale erstellt:

- Zwei Bauteile mit eigenständigen Wertströmen: Mit entsprechenden Quellen, Senken und Verarbeitungsprozessen
- Vier Fräsmaschinen als Kapazitätspool: Mit vergleichbaren Funktionen aber unterschiedlichen Leistungswerten. Drei dieser Maschinen werden anhand unterschiedlicher Methoden simuliert. Bei der vierten Anlage handelt sich um eine reale Maschine der Marke Exeron

- Zwei Drehmaschinen: Mit unterschiedlichen Funktionen und Leistungswerten
- Eine manuelle Montagestation mit definierten Montagezeiten
- Drei Materiallager: Zur Abbildung von Zwischenbeständen (WIP) sowie Harmonisierung des Materialflusses
- Elemente der Peripherie: Druckluft, Beleuchtung, Kühlschmierstoff

Der Zusammenhang zwischen diesen Elementen kann, wie in Bild 7-2 beschrieben, dargestellt werden:

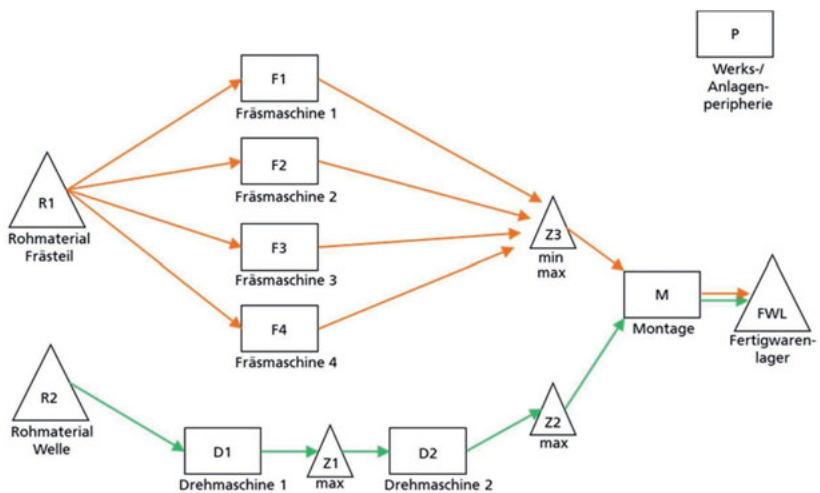


Bild 7-2: Skizzierung des Arbeitsrahmens

Diese Struktur wurde, wie in Bild 7-3 dargestellt, direkt in das entsprechende Simulationsmodell übertragen:

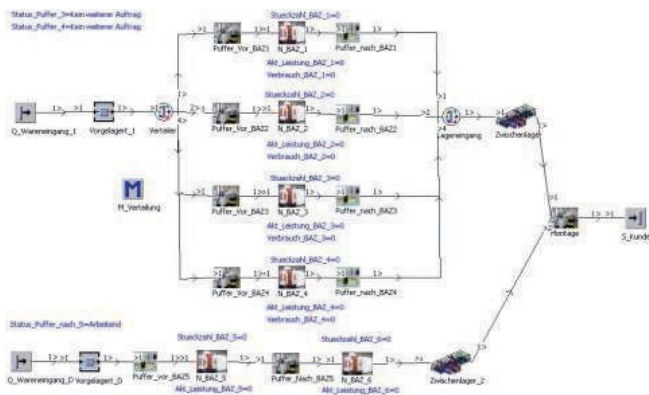


Bild 7-3: Modellierung der Arbeitsstruktur in Plant Simulation

## 7.2 ECOMATION Prozessanalyse und -bewertungstool

*S. Braun*

Neben den Technologieparametern, von denen zur Laufzeit des NC-Programms ohnehin lediglich Vorschub und Schnittgeschwindigkeit variiert werden können, bietet eine andere Bahnplanung und damit veränderte Schnittaufteilung und Schnitttiefe ebenso Potential zur Energieeinsparung aus Prozesssicht. Grundlegende Bearbeitungsstrategien wie beispielsweise die Schnittaufteilung innerhalb NC-Schruppzyklen wurden für die Drehbearbeitung untersucht. Drei unterschiedliche Strategien zur Schnittaufteilung (siehe Bild 7-4 rechts) wurden ausgewählt und betrachtet, sie sind in [HEI12a, HEI13] näher erläutert. Die virtuelle Bearbeitung des Referenzwerkstücks "Wellenteil 42CrMoV4" wurde für alle drei Strategien durchgeführt, wobei die Schnittgeschwindigkeit, die Schnitttiefe und die Vorschubgeschwindigkeit jeweils in drei Stufen variiert wurden. Wie in [VER11a,



HEI12a+b, HEI13] gezeigt, erweisen sich verschiedene Parameterkombinationen von Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe in energetischer Hinsicht als unterschiedlich effizient.

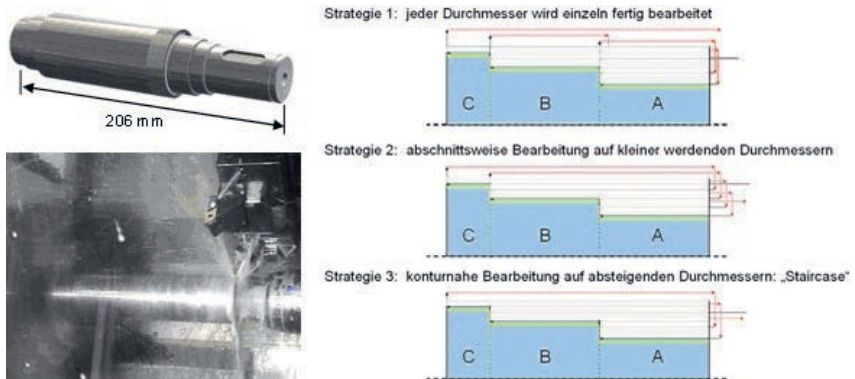


Bild 7-4: Alternative Schruppstrategien für die Wellenbearbeitung

Bei konstantem Zeitspanvolumen (MRR – Material Removal Rate) ist bei vorgegebener Schnittgeschwindigkeit eine große Schnitttiefe bei geringerem Vorschub energetisch effizienter als ein großer Vorschub bei geringerer Schnitttiefe (vgl. Bild 7-4 in [HEI12a] und Kapitel 2.1, Bild 2-6). Diese Regel trifft jedoch nur bei Betrachtung der direkt an der Zerspanung beteiligten Antriebe - und hier insbesondere der Hauptspindel - zu. Für die gesamte Maschine gelten infolge ihres festen und nicht unerheblichen Leerlauf-Grundverbrauchs andere Regeln. Die Schnittgeschwindigkeit hat bei allen Strategien einen deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch pro gefertigtem Teil infolge der erhöhten Leistungsaufnahme der Hauptspindel bei höherer Drehzahl. Als Folge der ständig anliegenden Grundlast ist der Energieverbrauch pro Werkstück aber umso geringer, je kürzer die Bearbeitung dauert.

Im Vergleich der drei Strategien (Bild 7-5 rechts) zeigt sich, dass die Strategien leicht unterschiedliche Bearbeitungszeiten aufweisen und auch unterschiedlich sensitiv auf Technologieparameteränderungen reagieren. Strategie 3 weist dabei die größte Abhängigkeit von Parameteränderungen auf, Strategie 1 die geringste. Im Bereich hoher Vorschübe und Schnitttiefen sind Strategie 1 und 3 der herkömmlichen, konservativen Schnittaufteilung (Strategie 2) überlegen.

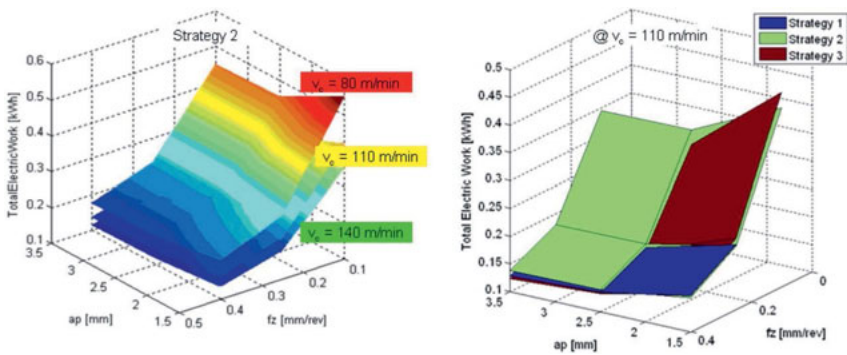


Bild 7-5: Energieverbrauch bei Strategie 2 in Abhängigkeit von Technologieparametern (links) und energetischer Vergleich der Schruppstrategien (rechts)

Trägt man den Energieverbrauch über dem sich ergebenden Zeitspanvolumen auf (spez. Energieverbrauch, Bild 7-5 links), so erkennt man eine geringe Sensitivität gegenüber Schnitttiefenänderungen  $a_p$  und eine höhere Sensitivität gegenüber Änderungen des Vorschubs  $f$  und der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ . Dies zeigt, dass in diesem Anwendungsfall die Vorschubgeschwindigkeit die effektivere Stellgröße zur Energieverbrauchsbeeinflussung darstellt als die Schnitttiefe.

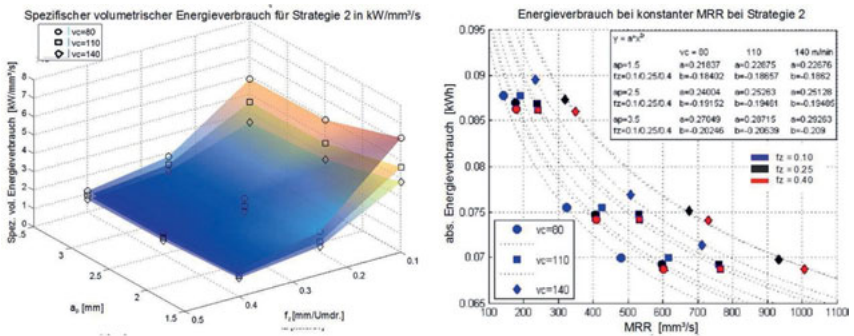


Bild 7-6: Spezifischer volumetrischer Energieverbrauch (links) und Energieverbrauch über dem Zeitspanvolumen (rechts)

Der Gradient nimmt bei zunehmender Schnittgeschwindigkeit zu, d.h. der Effekt kleiner Vorschubänderungen auf den Verbrauch wird mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit größer. In Bild 7-6 rechts ist ein grundlegender Potenz-Zusammenhang zwischen MRR und dem Energieverbrauch zu erkennen.

Bei der Referenz-Fräsbearbeitung ergeben sich andere Verhältnisse. In Bezug auf die Wahl der Bearbeitungsstrategie der Taschenbearbeitung ist bemerkenswert, dass der absolute Energieverbrauch zum Ausräumen der Kreistaschen nach Strategie A (konturnah zirkular) und B (abzeilen) nahezu gleich ist (Bild 7-7 links). Die Rechtecktaschenbearbeitung mit zirkularer, konturnaher Bahn (C) verbraucht jedoch gegenüber der Bearbeitung durch Abzeilen (D) weniger Energie. Die Sensitivitäten sind für Schnittgeschwindigkeit und Vorschub nahezu gleich mit leicht höherer Beeinflussungsmöglichkeit durch eine Vorschubänderung. Das Auftragen des Energieverbrauchs über dem Zeitspanvolumen (MRR) führt wiederum zu überschaubaren Zusammenhängen in Form eines Potenzgesetzes (Bild 7-7 rechts).

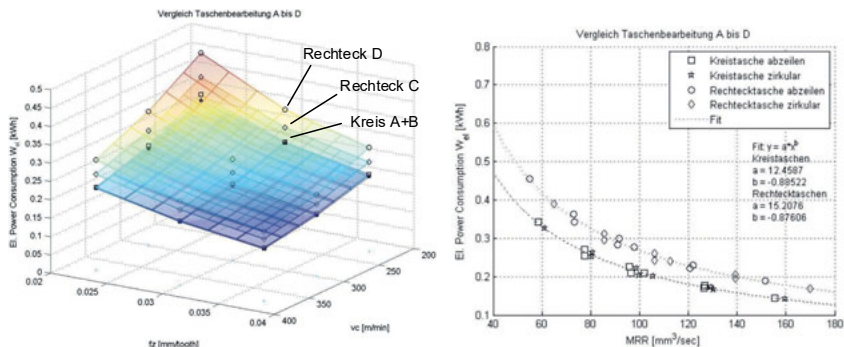


Bild 7-7: Energieverbrauch verschiedener Taschenbearbeitungsstrategien in Abhängigkeit der Zerspanparameter (links) und Vergleich der Abhängigkeiten vom Zeitspanvolumen MRR (rechts)

Die Konsequenz dieser Betrachtungen ist die Erkenntnis, dass bereits bei der Bahnplanung, d.h. in der Prozessplanung und CAM/NC-Programmerstellung, Einflussmöglichkeiten im Hinblick auf eine energetisch günstige Prozessführung bestehen und Optimierungsmaßnahmen bereits in dieser Phase ansetzen müssen, um mögliches Potenzial zur Energieeinsparung zu heben.

### 7.3 ECOMATION Maschinensimulationen

*E. Abele, P. Schraml*

Für den Demonstratorbetrieb wurde ein vereinfachtes Simulationsmodell der Demonstratormaschine aufgebaut (vgl. Bild 7-8). Dieses besteht aus den entsprechenden Simulationsmodellen von Haupt- und Nebenantrieben der Maschine als auch den drei Hauptverbrauchern: Rückkühler, Hydrauliksystem und Absaugung. Eingang für die Simulation sind Zeitreihen der jeweiligen

Kräfte und Geschwindigkeiten für die Linearachsen, Momente und Winkelgeschwindigkeit für die rotatorischen Achsen, als auch die Schaltzeitpunkte für Antriebsregelung, Absaugung und Hydraulik. Die Eingangsdaten für die Maschinensimulation werden im Bearbeitungsprozessmodell generiert und über eine standardisierte Excel-Datei übergeben. Durch die Trennung von Prozess- und Maschinenmodell ist es möglich bspw. Schnittkräfte und Geschwindigkeiten vorab zu berechnen und so Rechenzeit zu reduzieren. Das in Bild 7-8 dargestellte Gesamtmaschinenmodell berechnet entsprechend den so aufbereiteten Eingangsdaten die resultierende Leistungsaufnahme der berücksichtigten Funktionsmodule und gibt diese aggregiert zurück. Für die Implementierung in den Gesamtdemonstrator wurde das Maschinenmodell, wie in Kapitel 3.2.7 beschrieben, in eine Matlab/Simulink unabhängig lauffähige dll überführt. Die dll wiederum wird durch die umfassende Demonstratorumgebung aufgerufen.

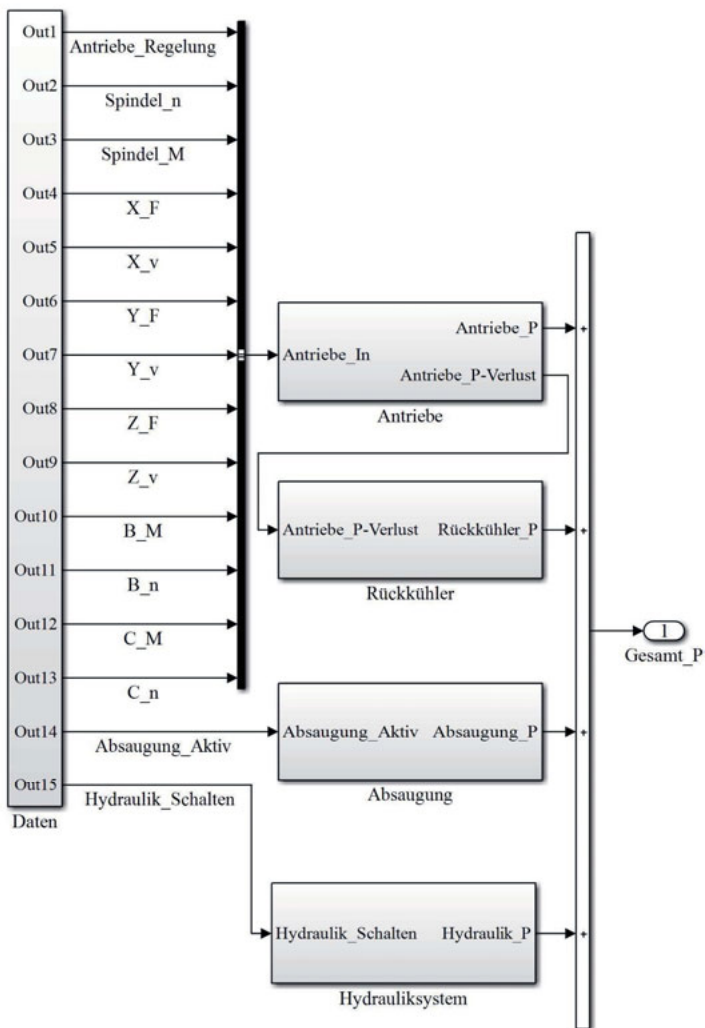


Bild 7-8: Vereinfachtes Matlab/Simulink Blockschaltbild der Demonstratormaschine

## 7.4 ECOMATION Demonstratormaschine

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

Die Hauptaufgabe des Frameworks für die energieoptimale Ansteuerung von Werkzeugmaschinen stellt die Anbindung von Energieoptimierern an die Werkzeugmaschine dar. Diese Funktionalität wird in einem zweiten Demonstrator, wie in Bild 7-2 dargestellt, realisiert.

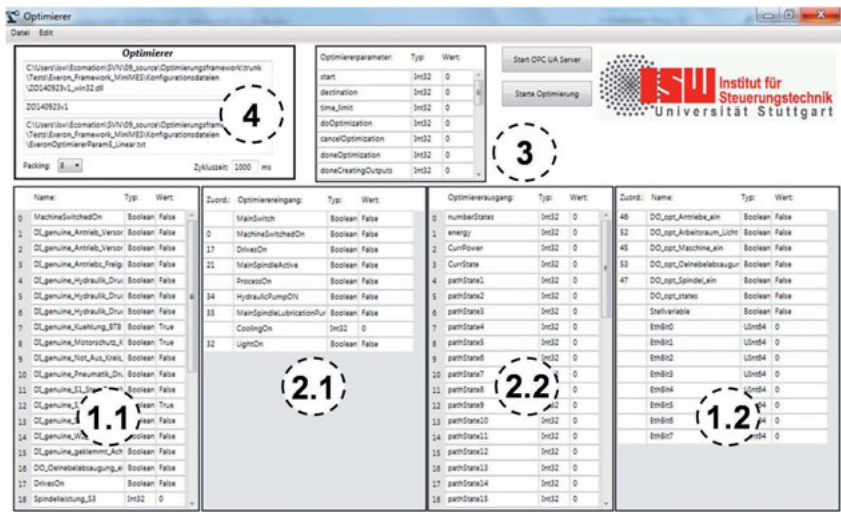


Bild 7-9: Demonstrator zur energieoptimalen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen

Durch Laden von EIDL einer Werkzeugmaschine werden unter Bild 7-2 Punkt 1.1 der energetische Istzustand der Werkzeugmaschine sowie unter Punkt 1.2 die verfügbaren Stelleingriffe dargestellt. Durch Laden der Optimiererbeschreibungsdatei werden unter Bild 7-2 Punkt 2.1 die Ein- und unter Punkt 2.2 die Ausgänge des Energieoptimierers angelegt sowie unter Bild 7-2 Punkt 3 die Parameter zur Parametrierung des Optimierers über OPC UA

Datenpunkte im Kommunikationsserver erzeugt. Unter Bild 7-2 Punkt 4 erfolgt die Darstellung des geladenen Energieoptimierers. Nach der Zuordnung des energetischen Istzustands der Werkzeugmaschine zu den Eingängen des Energieoptimierers sowie der Ausgänge des Optimierers zu den Stelleingriffen der Werkzeugmaschine kann die Optimierung gestartet werden.

Durch Ausführung der Optimierung wird der Energieoptimierer zyklisch im vorgegebenen Raster aufgerufen und ausgeführt. Der auf dem Framework basierende Demonstrator kümmert sich darum, dass zyklisch neue Istzustände von der Werkzeugmaschine abgeholt sowie die Stelleingriffe durchgeführt werden.

## 7.5 ECOMATION Planung- und Steuerung

*S. Wahren, E. Colangelo, Th. Bauernhansl*

Zielsetzung von Teilprojekt 3 war die Erhöhung der Energieeffizienz durch die Berücksichtigung des Energieverbrauchs bei der Planung und Steuerung. Wie im Abschnitt 5.4 erläutert, waren hierbei mehrere Zielgrößen während der Planungsphase gegeneinander zu gewichten und zu betrachten.

Das ECOMATION Planungstool bietet die Möglichkeit für das betrachtete Anwendungsbeispiel eine ausreichende Parametrisierung abzubilden, welche die Durchführung unterschiedlicher Planungsalternativen gestattet.

Diese Vorgehensweise dient zwei Zwecken:

- Die Möglichkeit zur Gewichtung und Betrachtung unterschiedlicher planerischer Zielgrößen ermöglicht es Unternehmen unterschiedliche Planungsalternativen zu vergleichen und zu bewerten



- Die Durchführung mehrerer Testläufe, stellt die Funktionalität des Modells sicher und evaluiert die Abbildungstreue gegenüber der der Realität

Demzufolge ergeben sich, für identisch definierte Problemstellungen unter unterschiedlichen Planungsprioritäten wie in Bild 7-10 dargestellt, voneinander abweichende Planungsalternativen.

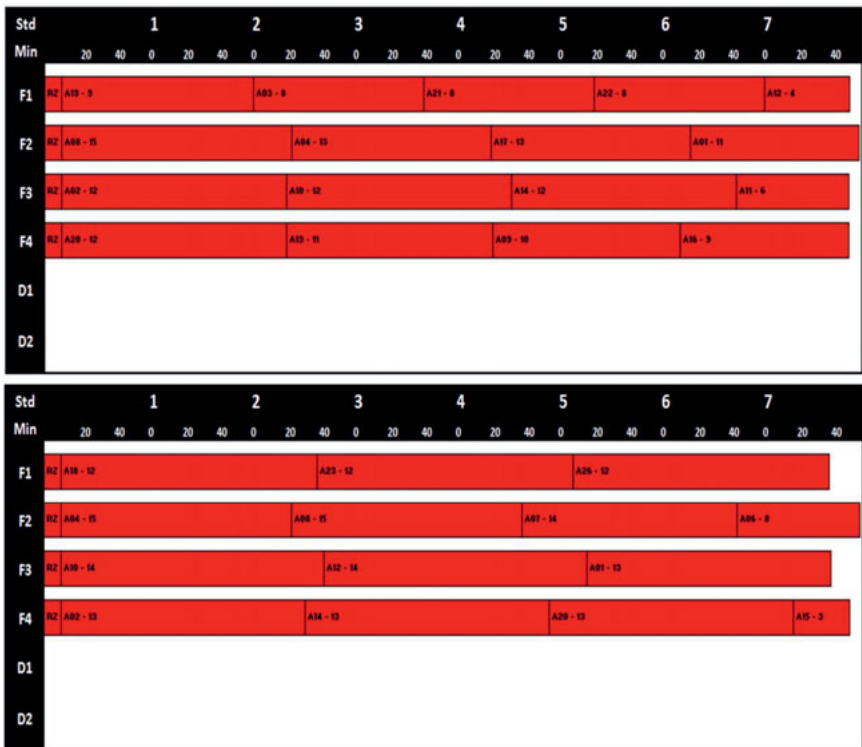


Bild 7-10: Maschinenbelastung unterschiedlicher Planungsalternativen

Jede dieser Planungsalternativen führt zu einer unterschiedlichen Belegungsplanung der Fertigungskapazitäten, je nachdem welche Planungskriterien priorisiert werden (Energieverbrauch, DLZ, Maschinenbelastung, usw.).

Zur echtzeitnahen Steuerung wird das ECOMATION Planungstool mit Daten aus verschiedenen simulierten und realen Maschinen gespeist. Die Datenübertragung erfolgt über OPC-Standard unter Anwendung der VDI 5600 Richtlinie.

Der dynamische Planungsprozess lässt sich, wie in Bild 7-11 dargestellt, wie folgt zusammenfassen.

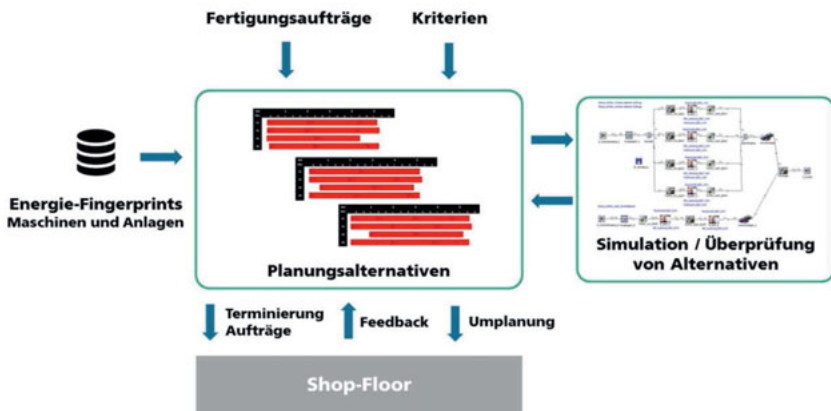


Bild 7-11: Planungs- und Steuerungsprozess

## 7.6 Versuchsszenario zur Energieeinsparung

*J. Schlechtendahl, Ph. Eberspächer, A. Verl*

Um den durch die Forschergruppe entstandenen Mehrwert zur energieoptimalen Ansteuerung von Werkzeugmaschinen anhand eines realen Nutzungsszenarios zu validieren, wurde bei einem mittelständischen Unternehmen

eine Energieverbrauchsmessung an einer Werkzeugmaschine mit Einzelplatzfertigung und manueller Bestückung durchgeführt. Hierbei wurde eine Energieverbrauchsmessung erzeugt, bei der an einem Tag im Zweischichtbetrieb nur ein Typ von Werkstück produziert worden ist. Diese Messung wurde in Maschinenzuständen (Aus, Produziert, Betriebsbereit) über einen Zeitraum von einem Tag diskretisiert. Hieraus ergab sich, dass auf der Werkzeugmaschine lediglich in 2/3 der Zeit ein Produktionsprogramm abgearbeitet worden ist. Die restliche Zeit befand sich die Werkzeugmaschine hingegen im Zustand ‚Betriebsbereit‘. Vor Beginn der ersten Schicht und nach Ende der letzten Schicht wurde die Werkzeugmaschine jeweils komplett abgeschaltet.

Basierend auf dieser Messung wurde ein vergleichbares Szenario im Labor aufgebaut. Als Werkzeugmaschine kam dabei eine Exeron HSC 600 zum Einsatz, für die ein NC-Programm mit identischer Abarbeitungszeit entwickelt worden ist. Die Exeron HSC 600 wurde dahingehend erweitert, dass Stelleingriffe über das Steuerungsbasierte Konzept über OPC UA durchgeführt werden können.

Zur Durchführung eines identischen Szenarios im Labor wurde ein kleines Manufacturing Execution System (MiniMES) entwickelt (wie in Bild 7-12 dargestellt), das es sowohl erlaubt, die Maschinensteuerung der Exeron HSC 600 als auch den Demonstrator anzusteuern. Durch das MiniMES konnte dann entsprechend den diskretisierten Zuständen entweder das NC-Programm ausgeführt oder, nach Abschluss des NC-Programms, die Pausenzeit bis zum nächsten Start des NC-Programms in Form einer Führungsgröße an den Demonstrator übertragen werden.

In den Demonstrator wurde zur Energieverbrauchsoptimierung ein Zustandsoptimierer geladen, der die Werkzeugmaschine in den jeweiligen energieoptimalen Zustand überführt.

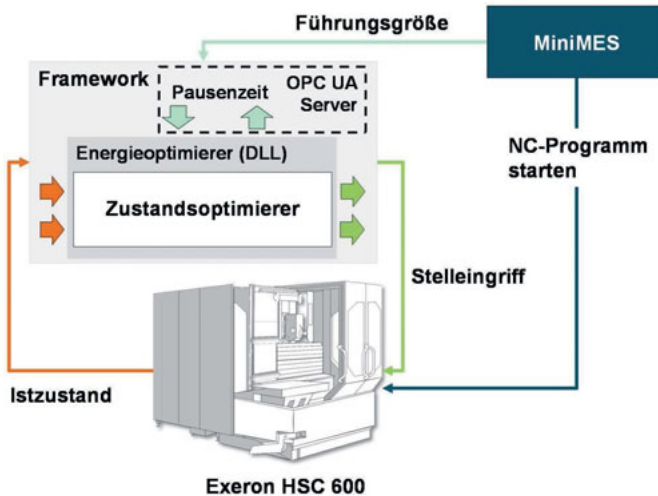


Bild 7-12: MiniMES zur Ansteuerung der Exeron HSC 600 und des Frameworks

Bei der Validierung der Ergebnisse wurde aufgrund von fehlenden Lizenzen für den OPC UA-Server nicht der komplette Tag abgebildet, sondern lediglich die erste Stunde betrachtet. Hierbei konnte bereits im ersten Versuch ohne eine werkzeugmaschinenspezifische Parametrierung des Zustandsoptimierers eine Energieeinsparung von 4.27% Prozent erreicht werden. Weitere Optimierung führte zu einem Einsparpotential von 16 %.

---

## 8 Zusammenfassung

*J. Schlechtendahl, A. Verl*

Die Forschergruppe ECOMATION hatte sich zum Ziel gesetzt, den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen durch steuerungstechnische Maßnahmen zu reduzieren und somit die Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen weiter zu steigern. Idealerweise kann die Leistungsaufnahme auf den reinen, für den Fertigungsprozess benötigten Leistungsbedarf reduziert werden ohne dabei die gängigen Zielgrößen wie Qualität, Produktivität, Sicherheit etc. außer Acht zu lassen.

Um die Zielgröße in die Steuerung zu integrieren, wurde in den Teilprojekten unterschiedliche Optimierer für den Prozess Fräsen, alle ansteuerbaren Komponenten sowie für die Gesamtmaschine entwickelt. Diese wurden durch Teilprojekt 2 in die Steuerungstechnik von Werkzeugmaschinen integriert.

Da die Optimierer maßgeblich von ihrem Produktionsumfeld und Rahmenbedingungen abhängen, existieren Schnittstellen in das Umfeld um Vorgaben zu erhalten. Diese Schnittstellen werden von der Produktionsplanung über die bereits beschriebenen Protokolle wie OPC UA und der darauf aufsetzenden Semantik nach VDI 5600 Blatt 3 bereitgestellt.

Insgesamt konnte in der Forschergruppe eine Einsparung von 16% des Energieverbrauchs in einem Referenzszenarios erreicht werden. Weiterhin hat sich gezeigt, dass durch Optimierung von Wechselbeziehungen zwischen Optimierern vermutlich weitere deutliche Einsparpotentiale zu erzielen sind.

Die erarbeiteten Erkenntnisse – insbesondere die Architektur zur Integration von Energieverbrauchsoptimierern in Maschinen und Anlagen - lassen sich weiterhin auf andere Branchen übertragen. Hierdurch können weitere Einsparungen umgesetzt werden.

---

## 9 Literaturverzeichnis

Referenz	Autoren	Quelle
[ABE11]	Abele, E.; Rothenbücher, S.:	Alles synchron - Optimale Ausnutzung von Synchron-Hauptspindelantrieben für Werkzeugmaschinen. In antriebstechnik, 2011; S. 26–29.
[ABE12a]	Abele, E.; Schraml, P.; Eisele, C.:	Abschätzung des Energieverbrauchs durch Kennfelder. In PRODUCTIVITY Management, 2012, 17; S. 26–28.
[ABE12b]	Abele, E.; Eisele, C.; Schrems, S.:	Simulation of the Energy Consumption of Machine Tools for a Specific Production Task. In (Dornfeld, A. D.; Linke, S. B. Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012; S. 233–237.
[ABE14]	Abele, E.; Sielaff, T.; Beck, M.:	Schlussbericht zum Projekt MaxiEM - Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen, 2014.
[ABE15]	Abele, E.; Braun, S.; Schraml, P.:	Holistic Simulation Environment for Energy Consumption Prediction of Machine Tools. In Procedia CIRP, 2015, 29; S. 251–256.

- [ALT03] Altintas Y.: Cutting Process Simulation and Optimisation. Tagungsband Fertigungstechnisches Kolloquium, Stuttgart, 2003, pp. 219-246.
- [ALT06] Altintas Y.: Manufacturing Automation. Cambridge University Press, 2000 (reprinted 2006).
- [BAU08] Bauer, G.: Ölhydraulik. Grundlagen, Bauelemente, Anwendungen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [BEC10] Beck, A., Gohner, P.: Generation of optimization proposals for electrical energy analysis of industrial automation systems. In: IEEE (Hrsg.): Energy Conference and Exhibition (EnergyCon). Manama, S. 114–119.
- [BIT13] Bittencourt, J. L.: Selbstoptimierende und bedarfsgerechte Steuerungsstrategien für Werkzeugmaschinen zur Steigerung der Energieeffizienz. Apprimus-Verl., Aachen, 2013.
- [CHA03] Charrad, N.; Kreis, M.: Innovative Konzepte für Motorspindeln: Trendbericht. In Werkstatt und Betrieb, 2003; S. 5–9.
- [DEV08] Dervisopoulos, M.: CO\$TRA – Life Cycle Costs Transparent, Abschlussbericht, Kurzfassung, PTW, Technische Universität Darmstadt, 2008, S. 26-27.
- [DIE08a] Dietmair, A.; Verl, A.: A Generic Energy Consumption Model for Decision Making and Energy Efficiency Optimisation in Manufacturing. In: Proc. of the 18th Intern. Conf. on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, (de Vin, L.J.), S. 389 – 396, University of Skövde, Sweden, 2008.
- [DIE08b] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. wt Werkstattstechnik online, Bd. 98, Nr. 7/8, S.640-645, 2008.



- [DIE08c] Dietmair, A.; Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. Eine  
Verl, A.; Methode zur effizienten Erfassung des Energiever-  
Wosnik, M.: brauchs von Produktionsmaschinen, 2008, 98; S.  
640–645.
- [DUF12] Duflou, J. R.; Suther- Towards energy and resource efficient manufactur-  
land, J. W.; Dorn- ing. A processes and systems approach. In CIRP  
feld, D.; Herrmann, Annals - Manufacturing Technology, 2012, 61; S.  
C.; Jeswiet, J.; Kara, 587–609.  
S.; Hauschild, M.;  
Kellens, K.:
- [EBE11] Eberspächer, Ph.; ECOMATION - Energieeffizienzsteigerung bei  
Schlechtendahl, J.; Werkzeugmaschinen durch steuerungstechnische  
Huf, A.; Dietmair, Maßnahmen. Green Automation, Technologiefo-  
A.; Verl, A.: rum, Fraunhofer IPA Tagung F 228, Tagungsband  
S. 88 - 101, Stuttgart, 29. März 2011.
- [EBE13] Eberspächer, Ph.; Realizing Energy Reduction of Machine Tools  
Verl, A.: Through a Control-integrated Consumption Graph-  
based Optimization Method, Procedia CIRP; Vol-  
ume 7, 2013, Pages 640–645; Forty Sixth CIRP  
Conference on Manufacturing Systems 2013;  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.046>.
- [EBE14] Eberspächer, Ph. et al.: A Model- and Signal-based Power Consumption  
Monitoring Concept for Energetic Optimization of  
Machine Tools. In 21st CIRP Conference on Life  
Cycle Engineering in Trondheim, Norway, 18-20  
June 2014., 2014, 15; S. 44–49.
- [EIS11] Eisele, C.; Energy-Efficient Machine Tools through Simulation  
Schrems, S.; in the Design Process. In (Hesselbach, J.;  
Abele, E.:

- Herrmann, C. Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011; S. 258–262.
- [ENG09] Engelmänn, J.: Methoden und Werkzeuge zur Planung und Gestaltung energieeffizienter Fabriken. (Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaft und Fabrikssysteme; 71) Chemnitz, Techn. Univ., Fak. Maschinenbau, Diss., 2009.
- [FIN06] Findeisen, D.: Ölhydraulik. Handbuch für die hydrostatische Leistungsübertragung in der Fluidtechnik. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2006.
- [GON13] Gontarz, A. M.; Hanni, F.; Weiss, L.B. & Wegener, K.: Machine tool optimization strategies for ecologic and economic efficiency. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 227 (1), S. 54–61.
- [HAA13] Haag, H.; Westkämper, E. (Hauptbericht): Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion Stuttgart : Fraunhofer Verlag, 2013. (Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung; 2). (Stuttgart, Univ., Fak. Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Inst. für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Diss. 2013).
- [HEI12a] Heisel, U.; Braun, S.: Simulation and Prediction of Process-Oriented Energy Consumption of Machine Tools. 19th CIRP International Conference on Lifecycle Engineering 2012, UC Berkeley, CA, USA, May 23-25, 2012, pp. 245 - 250.
- [HEI12b] Heisel, U.; Braun, S.: Simulation and Prediction of Process-Related Power Consumption of Machine Tools. 2. WGP-Jahreskongress, Berlin, 27.-28.06.2012.

- [HEI13] Heisel, U.; Braun, S.: Prognose des prozessabhängigen Energieverbrauchs (Simulations- und Prognosemodell für den prozessabhängigen Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen), article in 2 parts, wt-online, ed. 1 and 2, 2013.
- [KEI14] Keinert, M.: Schnittstelle verbessert Schnittstelle verbessert Kommunikation zwischen HMI und Steuerung. In: Verein Deutscher Werkzeugmaschinenfabriken (Hrsg.): Branchenreport - Nachrichten für die Werkzeugmaschinenindustrie. Frankfurt: VDW.
- [KIE57] Kienzle, O.; Victor, H.: Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung. In: Werkstofftechnik und Maschinenbau 47, 1957, No. H5, pp. 224–225.
- [KIM97] Jang-Mok, Kim; Seung-Ki, Sul: Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation. In IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33; S. 43–48.
- [KUH09] Kuhrke, B.; Rothenbächer, S.; Dervisopoulos, M.: Die Energiebilanz muss stimmen. In Werkstatt und Betrieb, 2009, 140; S. 20–26.
- [KUH11] Kuhrke, B.: Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen. epubli GmbH, Berlin, 2011.
- [LAR12] Larek, R. Ressourceneffiziente Auslegung von fertigungstechnischen Prozessketten durch Simulation und numerische Optimierung. Shaker, Aachen, 2012.
- [LI11] Li, W.; Zein, A.; Kara, S.; Herrmann, C.: An Investigation into Fixed Energy Consumption of Machine Tools. In: Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, (Hesselbach, J., Herrmann, C.) DOI: 10.1007/978-3-642-19692-8\_1,

- S. 268 - 273, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2011.
- [MAT08] Mattes M.: Zerspansimulationslösungen für die Werkzeug-konstruktion und Prozessauslegung beim Fräsen, TU Berlin, Tübingen, 2008.
- [MEC12] Mechs, S. et al.: Networked priced timed automata for energy-efficient factory automation: 2012 American Control Conference - ACC 2012; S. 5310–5317.
- [MIN09] Mink, F. et al.: Drehmomentoptimale Regelung von PM-Motoren mit vergrabenen Magneten durch einen industriellen Servoregler: Fachkonferenz Elektrische Automatisierung SPS/IPC/Drives, Nürnberg, 2009; S. 485–493.
- [MOR90] Morimoto, S. et al.: Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity. In IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26; S. 866–871.
- [MUE09] Müller, E.; Engelmann, J.; Löffler, T.; Berlin; Heidelberg: Springer, 2009.  
Strauch, J.:
- [NEU11] Neugebauer, R. et al.: Optimierung des Energiebedarfs der CNC-gesteuerten Bearbeitung. In Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF, 2011, 106; S. 491–495.
- [PAU08] Paucksch, E. et al.: Zerspantechnik. Prozesse, Werkzeuge, Technologien. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [QUR12] Qureshi, F. et al.: Unit Process Energy Consumption Models for Material Addition Processes: A Case of the Injection Molding Process. In (Dornfeld, A. D.; Linke, S. B. Hrsg.): Leveraging Technology for a Sustainable World: Proceedings of the 19th CIRP Conference

- on Life Cycle Engineering, University of California at Berkeley, Berkeley, USA, May 23 - 25, 2012. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012; S. 269–274.
- [SCH01] Schiefer, E.: Ökologische Bilanzierung von Bauteilen für die Entwicklung umweltgerechter Produkte am Beispiel spanender Fertigungsverfahren. Aachen: Shaker, 2001 (Darmstädter Forschungsberichte für Konstruktion und Fertigung) Darmstadt, Techn. Univ., Fak. für Maschinenbau, Diss., 2000.
- [SCH04] Schenk, M., Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb: Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik Berlin u.a. : Springer, 2004. - ISBN 3-540-20423-7.
- [SCH09] Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Grundlagen. Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben. Springer, Dordrecht, 2009.
- [SCH12] Schlechtendahl, J. et al.: Automated Approach to Exchange Energy Information. In (Schuh, G.; Neugebauer, R.; Uhlmann, E. Hrsg.): Future Trends in Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012; S. 47–54.
- [SCH15a] Schlechtendahl, J. et al.: Automated Approach to Exchange Energy Information. In (Schuh, G.; Neugebauer, R.; Uhlmann, E. Hrsg.): Future Trends in Production Engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012; S. 47–54.
- [SCH15b] Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [SUK03] Sukaylo, V.: Numerische Simulation der thermisch bedingten Werkstück-Abweichungen beim Drehen mit unterschiedlichen Kühlschmiermethoden. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2003.

- [TÖN04] Tönshoff, H. K., Spanen, Grundlagen, Springer, Berlin/Heidelberg, Denkena, B.: 2004.
- [USU78] Usui E, Shirakashi T, Analytical prediction of three-dimensional cutting processes – Part 3: cutting temperatures and crater wear in a carbide tool, Journal of Engineering for Industry, Vol. 100; 1978, pp. 236-243.
- [VER11a] Verl, A. et al.: Modular Modeling of Energy Consumption for Monitoring and Control. In (Hesselbach, J.; Herrmann, C. Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2011; S. 341–346.
- [VER11b] Verl, A.; Westkämper E.; Abele, E.; Dietmair, A.; Schlechtendahl, J.; Friedrich, J.; Haag, H.; Schrems, S.: Architecture for Multilevel Monitoring and Control of Energy Consumption, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, S. 347-352, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 2. – 4. Mai 2011.
- [VIE55] Vieregge G.: Temperaturfeld und Wärmebilanz des Schvorwgangs bei der Zerspanung, Werkstatt und Betrieb, (ed. 5), 1955, pp. 227-230.
- [WEI10] Weinert, N.: Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2010.
- [WES06] Westkämper, E., Einführung in die Fertigungstechnik Wiesbaden: Warnecke, H.-J.: Vieweg + Teubner 2010 8., aktual. und erw. Aufl. 978-3-8348-0835-6.
- [WIL14] Will, D.: Hydraulik. Grundlagen, Komponenten, Systeme. Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.

- [ZEI11] Zein, A., Li, W., Herrmann, C. & Kara, S.: Energy Efficiency Measures for the Design and Operation of Machine Tools: An Axiomatic Approach. In: J. Hesselbach and C. Herrmann (Hrsg.): Globalized solutions for sustainability in manufacturing. Heidelberg: Springer, S. 274–279. ISBN 978-3-642-19691-1.
- [ZEK07] Zekhanov, Ju. A., Storchak M.: Analysis of Contact Width Changing Regularity on Basis of Variational Orthogonal Cutting Model, in: Theory and Practice of Engineering Equipment, Voronezh (2007), Vol. 15, pp. 65 – 71.
- [ZUL10] Zulaika, J.J.; Dietmair, A.; Campa, F.N.; Lopez de Lacalle, L.N.; Verbeeten, W.: Eco-efficient and highly productive production machines by means of a holistic Eco-Design approach. The 3rd International Conference on Eco-Efficiency, Session 6: Eco-Innovation, Egmond aan Zee, Niederlande, 10. Juni 2010.





# Online-Buchshop für Ingenieure

■ ■ VDI nachrichten

BUCHSHOP

Online-Shops



**Fachliteratur und mehr -  
jetzt bequem online recher-  
chieren & bestellen unter:  
[www.vdi-nachrichten.com/](http://www.vdi-nachrichten.com/)  
Der-Shop-im-Ueberblick**



**Täglich aktualisiert:  
Neuerscheinungen  
VDI-Schriftenreihen**



Im Buchshop von [vdi-nachrichten.com](http://vdi-nachrichten.com) finden Ingenieure und Techniker ein speziell auf sie zugeschnittenes, umfassendes Literaturangebot.

Mit der komfortablen Schnellsuche werden Sie in den VDI-Schriftenreihen und im Verzeichnis lieferbarer Bücher unter 1.000.000 Titeln garantiert fündig.

Im Buchshop stehen für Sie bereit:

**VDI-Berichte** und die Reihe **Kunststofftechnik**:

Berichte nationaler und internationaler technischer Fachtagungen der VDI-Fachgliederungen

**Fortschritt-Berichte VDI:**

Dissertationen, Habilitationen und Forschungsberichte aus sämtlichen ingenieurwissenschaftlichen Fachrichtungen

**Newsletter „Neuerscheinungen“:**

Kostenfreie Infos zu aktuellen Titeln der VDI-Schriftenreihen bequem per E-Mail

**Autoren-Service:**

Umfassende Betreuung bei der Veröffentlichung Ihrer Arbeit in der Reihe Fortschritt-Berichte VDI

**Buch- und Medien-Service:**

Beschaffung aller am Markt verfügbaren Zeitschriften, Zeitungen, Fortsetzungsreihen, Handbücher, Technische Regelwerke, elektronische Medien und vieles mehr – einzeln oder im Abo und mit weltweitem Lieferservice

VDI nachrichten

BUCHSHOP

[www.vdi-nachrichten.com/Der-Shop-im-Ueberblick](http://www.vdi-nachrichten.com/Der-Shop-im-Ueberblick)

## Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
  - 2 Fertigungstechnik
  - 3 Verfahrenstechnik
  - 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
  - 6 Energietechnik
  - 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
  - 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
  - 10 Informatik/Kommunikation
  - 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
  - 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
  - 15 Umwelttechnik
  - 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
  - 21 Elektrotechnik
  - 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-369502-7