



# Diplomarbeit

## Erhebung energetischer Daten eines Fertigungssystems und Einbindung in ein diskretes Simulationsmodell zur energieeffizienten Produktion

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Friedrich Bleicher**  
(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Markus Lechner**

0625683 (066.482)

Kaiser-Franz-Josef-Straße 52

1230 Wien

Wien, im Juni 2015

---

Markus Lechner

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und, dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Juni 2015

---

Markus Lechner

## Danksagung

Einleitend möchte ich all jenen danken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zur Erstellung dieser Diplomarbeit maßgeblich beigetragen haben.

Für die ausgezeichnete Betreuung und die anregenden Gespräche bin ich vor allem Univ.-Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Friedrich Bleicher zu großem Dank verpflichtet.

Des Weiteren möchte ich Dipl. Ing. Fabian Dür und Dipl. Ing. Matthias Hacksteiner meinen Dank aussprechen. Durch ihre fachliche Kompetenz und ihr kritisches Hinterfragen gaben sie mir wertvolle Hinweise und haben dadurch zur Vollendung der Arbeit beigetragen.

Abschließend möchte ich ganz besonders meiner Familie für die moralische und finanzielle Unterstützung während meines Studiums danken.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erstellung und Umsetzung eines Konzepts zur Einbindung von Betriebs- und Messdaten aus einem Energiemonitoringsystem einer Fertigungsstätte in ein ereignisorientiertes Simulationsmodell.

Diese Thematik ist vor allem für jene produzierenden Unternehmen von Interesse, die nach geeigneten Ansätzen und Werkzeugen zur Verarbeitung und Interpretation energetischer Daten aus einem permanenten Erfassungssystem suchen. Indem die Simulation dazu beiträgt, Optimierungspotenziale zu finden und es ermöglicht, Alternativszenarien zu analysieren, sind diese Betriebe damit in der Lage, einen Wettbewerbsvorteil über eine energieeffiziente Fertigung zu generieren.

Das entwickelte Konzept wird im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes zur Erhebung, Verarbeitung und Interpretation von Energiedaten in der Demonstrations- und Innovationsfabrik mi-factory im Technologiezentrum Aspern IQ integriert und die Funktionalität im Zuge eines Simulationsexperiments zur Visualisierung energetischer Einflussfaktoren getestet. Neben dem Einfluss der Rüst-, Bearbeitungs- und Werkstückwechselzeit werden dabei vor allem die Bedeutung der Losgröße und die Auswirkung der allseits angestrebten „Losgröße 1“ auf den Energiebedarf ersichtlich. Bei der Konzeptentwicklung wird speziell auf eine beliebige Erweiterbarkeit des Simulationsmodells und auf die Realisierbarkeit der Maschinendatenerfassung in unterschiedlichen Produktionsstätten geachtet. So werden beispielweise verschiedene Methoden zur Ermittlung des Betriebszustands von Werkzeugmaschinen über eine SCADA-Software entwickelt und ein Tool für die automatische Erfassung der für die Simulation relevanten Betriebsdaten und des Maschinen-Nutzungsprofils erarbeitet.

## Abstract

This master thesis presents a distinctive concept, which combines real-time data collection of a production system on the one hand, and a solution-oriented discrete simulation model on the other hand. This technique delivers information, which provides results for sustainably advanced and efficiency maximizing energy consumption in production sites.

Especially companies deploying power monitoring devices can particularly benefit from this unique method of processing archived data and providing adequate data interpretation at the same time for highlighting inefficient energy consumption phases. Hence having a lasting competitive advantage with this innovative simulation model, production processes can be simulated in advance and production can be optimized by achieving maximal efficiency with minimal time investment.

The presented concept was successfully implemented and verified in the Aspern IQ mi-factory laboratories. Innovative methods were developed to collect, handle and analyse data of the production site and then examine its functionality through the visualisation of independent energy variables. Based on the evaluation of manufacturing processes, the distinguishing factors for the energy efficiency of the machine shop were explored and determined. The primary goal of this technique is to achieve sustainable energy efficiency due to the determination of decisive parameters, targeted considering setup, part change and machining time. Finally, the impact of the aimed lot-size on energy efficiency can be anticipated with this simulation model.

Expandability and universal applicability of the implemented procedures characterise the outcome of this project, which therefore, can be duplicated and adopted easily into other production sites. Comprehensive software methods were developed and implemented for achieving the accurate determination of the operating status of the machines under consideration. Finally, a tool was developed, which enables the production of standardised reports due to automatic collection of adequate information. This final piece in the model founds the layer for facilitated follow-up calculations.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	8
2	Grundlagen und Stand der Technik .....	9
2.1	Steuerung einer CNC-Werkzeugmaschine .....	10
2.1.1	Aufgaben der Steuerung einer Werkzeugmaschine .....	10
2.1.2	Aufbau der CNC-Steuerung.....	11
2.2	Betriebsdatenerfassung .....	13
2.2.1	Betriebszustände von CNC-Werkzeugmaschinen .....	14
2.2.2	Erfassung der Betriebszustände über Leistungsniveaus .....	15
2.2.3	Erfassung der Betriebszustände über Steuerungsdaten .....	18
2.2.4	Energiedatenerfassung.....	20
2.2.5	Auswahl der Messgeräte .....	23
2.3	Modellierung der Energieaufnahme .....	29
2.3.1	Der Modellbegriff und grundlegende Aspekte von Modellen .....	29
2.3.2	Modelle zur Energiebedarfsanalyse.....	31
2.4	Simulation eines Produktionssystems unter energetischen Aspekten .....	34
2.4.1	Einteilung und Ablauf eines Simulationssystems.....	36
2.4.2	Einsatz von Simulation in der Produktion .....	38
2.4.3	Energetische Aspekte in der Materialflusssimulation.....	40
2.5	Energieeffizienz-Aspekte in der Produktion.....	42
2.5.1	Spezifischer Energiebedarf als Vergleichsgröße .....	42
2.5.2	Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz .....	43
2.5.3	Einfluss der Arbeitsvorbereitung auf den Energieverbrauch.....	47
3	Zielsetzung und Vorgehen .....	51
4	Systemaufbau .....	52
4.1	Werkzeugmaschinen.....	54
4.1.1	EMCO Maxxturn 45 .....	54
4.1.2	HERMLE C42U.....	55
4.1.3	HAAS VF-2 .....	56
4.2	Messtechnik .....	57
4.2.1	Elektrische Messungen.....	58

---

4.2.2	Druckluftmessung .....	60
4.3	Datenerfassung und -verarbeitung .....	60
4.4	Simulationssoftware .....	64
5	Praktische Umsetzung .....	68
5.1	Energiemessung und Monitoring .....	68
5.2	Bestimmung der Betriebszustände .....	71
5.2.1	Bestimmung der Betriebszustände über Steuerungsdaten .....	71
5.2.2	Bestimmung der Betriebszustände über Messwerte .....	74
5.3	Datenerhebung in der Aspern IQ mi-Factory .....	77
5.4	Modellierung der Simulationsumgebung .....	78
5.4.1	Modellierung einer Werkzeugmaschine .....	79
5.4.2	Implementierung der simulierten Leistungsaufnahme .....	82
5.4.3	Modellierung des elektrischen Druckluftäquivalents .....	85
5.4.4	Modellierung der gesamten Produktionsanlage .....	86
5.5	Validierung des Simulationsmodells .....	88
5.6	Simulative Analyse von Alternativ-Szenarien .....	91
5.7	Durchführung der Simulationsexperimente .....	93
5.7.1	Ausgangssituation der Simulationsexperimente .....	95
5.7.2	Bestimmung der Einflussfaktoren für das Experiment .....	96
5.7.3	Bestimmung der maximalen Losgröße .....	97
6	Ergebnisse und Diskussion .....	99
6.1.1	Auswertung auf Bauteilebene .....	100
6.1.2	Auswertung auf Maschinenebene .....	102
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	105
8	Anhang .....	107
8.1	Liste wichtiger SINUMERIK 840D sl-Signale .....	107
8.1.1	Zuordnung Datenbaustein (DB)-Nummern zu Nahtstellen .....	108
8.2	Lastgänge der Bauteile .....	109
8.2.1	HAAS VF-2 .....	109
8.2.2	HERMLE C42U .....	110
8.2.3	EMCO Maxxturn 45 .....	112
8.3	Produktionsreihenfolge-Experiment Ausgangslage .....	113

---

8.3.1	EMCO Maxxturn 45 .....	113
8.3.2	HERMLE C42U.....	114
8.3.3	HAAS VF-2.....	114
8.4	Quellcodes wichtiger Plant Simulation-Methoden .....	115
8.5	WinCC OA Quellcodes.....	118
9	Literaturverzeichnis .....	123
10	Abbildungsverzeichnis.....	128
11	Tabellenverzeichnis .....	131
12	Abkürzungsverzeichnis .....	132

# 1 Einleitung

In Zeiten steigender Energiepreise und einer erhöhten Nachfrage an endlichen Ressourcen erkennen immer mehr Unternehmen die Chance, einen Wettbewerbsvorteil durch die Optimierung des Energieverbrauchs ihrer zu generieren. Der Ruf nach ganzheitlichen Ansätzen zur Energieeffizienzsteigerung wird damit immer lauter.

Um Optimierungspotenziale aufdecken und Verbesserungsmaßnahmen überwachen zu können, setzen immer mehr Unternehmen auf eine automatische Betriebs- und Maschinendatenerfassung in ihren Produktionsstätten. Darunter fällt auch die kontinuierliche Aufnahme und Speicherung von elektrischen Leistungsdaten der Maschinen. Dieses sogenannte Monitoring alleine ist jedoch noch kein genügend hinreichendes Hilfsmittel, um das gewünschte Ziel einer energieeffizienten Fertigung zu erreichen. Benötigt werden Ansätze und Methoden zur automatisierten Verarbeitung und Interpretation der Daten sowie deren Einbindung in geeignete Simulationsprogramme, um eine Hilfestellung für die optimale Ausrichtung des Einsatzes von Ressourcen zu liefern.

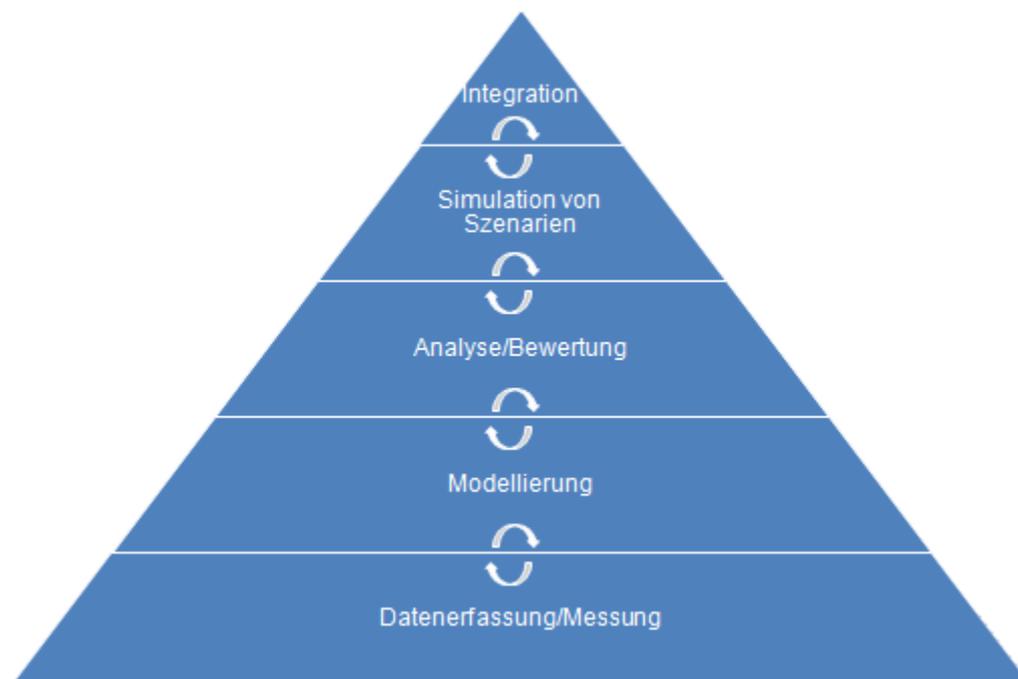
Die vorliegende Diplomarbeit greift diese Punkte auf und führt sie zu einem Konzept zur Simulation des Energieverbrauchs im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes zusammen. Die dabei entwickelten Methoden ermöglichen eine automatische Aufbereitung von Energiedaten, die durch ein Monitoringsystem aufgenommen werden. Die anschließende Einbindung in ein zustandsbasiertes Modell erlaubt die Darstellung des detaillierten Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen in einem Simulationsprogramm. Als Primärziel kann dabei die Identifizierung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Produktionssystemen gesehen werden. Bei der Konzeptentwicklung wurde speziell auf eine beliebige Erweiterbarkeit und auf die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Produktionsstätten geachtet.

Die Umsetzung des Konzepts wird an der bestehenden Produktionsstätte mi-factory, der Demonstrations- und Innovationsfabrik der researchTUb im Technologiezentrum Aspern IQ, erprobt. Der Aufbau der verwendeten Mess- und Softwarekomponenten wird für die vorliegende Arbeit dokumentiert und der Verwendungszweck als Planungs- und Bewertungswerkzeug von Produktionsabläufen anhand verschiedener Szenarien ersichtlich gemacht. Über Simulationsexperimente wird der Einfluss verschiedener Faktoren auf den Energieverbrauch der mi-factory gezeigt, wobei hierbei Daten als Basis dienen, welche am realen System erhoben wurden. Neben dem Einfluss der Rüst-, Bearbeitungs- und Werkstückwechselzeit soll vor allem der Einfluss der Losgröße und die Bedeutung der allseits angestrebten „Losgröße 1“ auf den Energiebedarf gezeigt werden.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Im Zuge dieses Kapitels werden die Handlungsfelder des Themengebiets Energieeffizienz in der Produktion dargestellt, um eine Klassifizierung und Beschreibung der im Zuge dieser Arbeit betrachteten Forschungsansätze sowie der derzeit verwendeten Verfahren ermöglichen zu können. Des Weiteren werden technische Grundlagen insbesondere in Bezug auf die Maschinensteuerung, Maschinenkomponenten und Messtechnik zusammengefasst erläutert.

Nach dem ganzheitlichen Ansatz zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion von Hermann [1] lässt sich das Themengebiet Energieeffizienz in der Produktion in mehrere Handlungsfelder unterteilen. Basierend auf einmaliger oder permanenter Datenerfassung sowie dem Verständnis der Wirkzusammenhänge und unter Anwendung geeigneter Methoden zur Bewertung und Vorhersage des Betriebsverhaltens, soll die Optimierung von Energieverbräuchen in die betriebliche Entscheidungswelt integriert werden.



**Abbildung 1: Handlungsfelder des Themenfelds Energieeffizienz in der Produktion (vgl. [1] Seite 3)**

Diese Handlungsfelder sind in Abbildung 1 dargestellt und können ganz allgemein wie folgt beschrieben werden (vgl. [1] Seite 3f):

- Unter Datenerfassung bzw. -messung versteht man das zeit- oder zustandsabhängige Erfassen relevanter Input- und Outputflüsse.
- Modellierung bezeichnet die Beschreibung und das Verstehen von Abläufen und Wechselwirkungen sowie die Zuordnung zu Betriebszuständen.

- Die Analyse bzw. Bewertung behandelt die Erschließung geeigneter Konzepte zur nachhaltigkeitsorientierten Bewertung und die Lösung von Zielkonflikten. Auch die Bildung von Kennzahlen ist Teil dieses Handlungsfeldes.
- Die Simulation von Szenarien hat das Ziel, eine Vorhersage über den Verbrauch oder das Emissionsverhalten zu treffen.
- Die Integration bindet schließlich Maßnahmen in die betriebliche Daten- und Planungswelt ein und verfolgt dabei das Ziel einer kontinuierlichen Verbesserung.

Im theoretischen Teil dieser Arbeit wird der in Abbildung 1 dargestellte Ansatz als Leitfaden für die Beschreibung der theoretischen Hintergründe verwendet, wobei auch die Handlungsfelder näher beschrieben werden.

## 2.1 Steuerung einer CNC-Werkzeugmaschine

Angeichts der Komplexität heutiger Fertigungsprozesse und des hohen Automatisierungsgrades moderner Produktionsanlagen haben elektrische Steuerungen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Sie beeinflussen die Qualität und Effizienz des Fertigungsprozesses maßgeblich. Durch die rasante Entwicklung im Bereich der Mikroelektronik sind heute leistungsfähige Steuerungssysteme auf dem Markt verfügbar, die selbst unter strengen Echtzeitbedingungen mehrere tausend Prozesssignale sicher verarbeiten können. Aufgabe der Steuerung ist es dabei, die Vielzahl von Prozesssignalen beispielsweise aus der zu steuernden Maschine einzulesen, die notwendigen Steuersignale entsprechend den logischen Verknüpfungen zu bestimmen und an die Stellglieder auszugeben (vgl. [2] Seite 99f).

### 2.1.1 Aufgaben der Steuerung einer Werkzeugmaschine

Die Steuerung einer Werkzeugmaschine lässt sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, über die zu lösenden Aufgaben charakterisieren. Den Funktionsumfang kann man dabei in die folgenden Kategorien einteilen (vgl. [3] Seite 435):

- Kommunikationsaufgaben
  - Kommunikation mit der angeschlossenen Peripherie, wie z.B. Eingangs- und Ausgangsbaugruppen, Sensoren oder Endschaltern
  - Kommunikation mit dem Bediener in einer Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human-Machine-Interface HMI) und dem Programmierer in einer Programmierumgebung, welche mindestens einen Programmeditor, oft aber auch Simulations- und Testeinrichtungen umfasst

- Signalverarbeitung
  - Koordination von Abläufen als standardisierte Ablaufsteuerung
  - Realisieren von Überwachungsfunktionen (Begrenzungen)
  - Gewährleisten von Sicherheitsfunktionen (Not-Aus)
- Ansteuern von Aktoren, Schnittstelle für Sensoren
  - Erzeugen von Bewegungsprofilen (Bewegungsplanung/Interpolation)
  - Regelung von Prozessgrößen (Weg, Geschwindigkeit, Moment, Druck, Kraft, Temperatur)

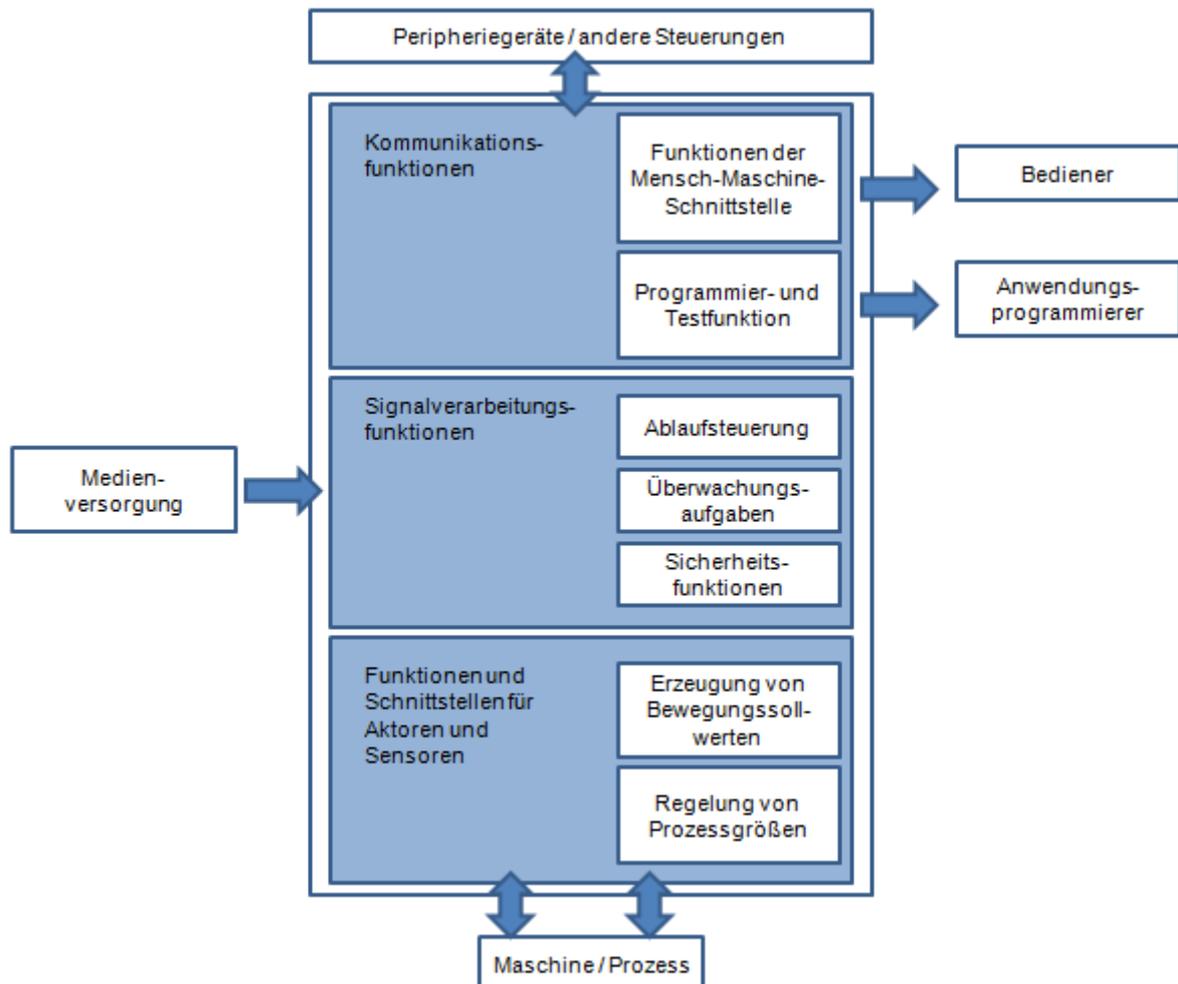


Abbildung 2: Aufgaben der Steuerung einer Werkzeugmaschine (vgl. [4] Seite 7)

## 2.1.2 Aufbau der CNC-Steuerung

Die Steuerung einer Werkzeugmaschine obliegt üblicherweise der Klasse der Computerized Numerical Control (CNC)-Steuerungen. Darunter versteht man eine zahlenbasierte Steuerung mit mindestens einer Recheneinheit (Mikroprozessor). Wie in Abbildung 3 schematisch dargestellt, besteht sie aus einem Kommunikations-(COM)-Teil, dem Numerical Control-(NC)-Kern und einem Programmable Logic Control-(PLC)-Teil.

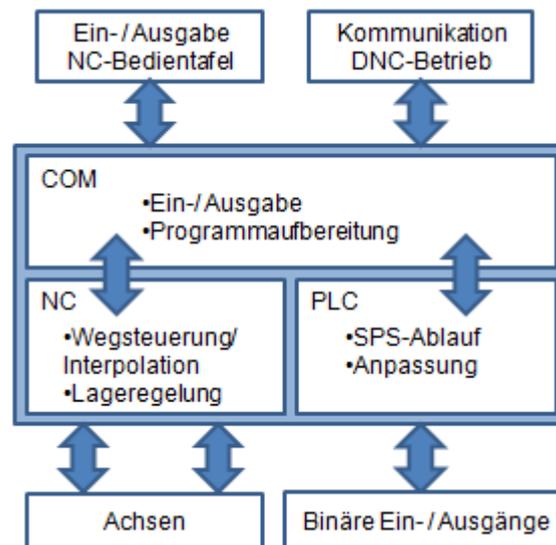


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Werkzeugmaschinensteuerung (vgl. [3] Seite 436)

Der Kommunikations-(COM)-Teil wird allgemein auch als Human-Machine-Interface (HMI) bezeichnet. Er realisiert die Interaktion zwischen Maschinensystem und dem Benutzer. Der Zugang des Anwenders zu einer NC-Steuerung erfolgt über einen Bildschirm (ggf. mit zusätzlichen Tasten oder als Touch-Panel) und eine Tastatur. Mit den dazugehörigen Speichermedien und Funktionen zur Programmaufbereitung bilden diese Komponenten den COM-Teil der Steuerung.

Der Numerical Control-(NC)-Kern beinhaltet die Hauptfunktionalität einer Werkzeugmaschinensteuerung, also die Wegsteuerung und Interpolation und damit die Erzeugung von Bewegungssollwerten. Dabei bestimmt die technologische Aufgabe die konkrete Ausprägung der Sollwertprofile. Das Nachführen der Bewegungen erfolgt durch eine Lageregelung an den NC-Achsen. Durch Maschinenkonzepte mit mehreren an der Bearbeitung beteiligten Achsen gewinnt die Bewegungskoordination einzelner Antriebe an Bedeutung. Anzeigen und Editoren sowie die Datenspeicherung können ebenfalls dem NC-Kern zugeordnet werden (vgl. [3] Seite 436).

Der Programmable Logic Control-(PLC)-Teil (zu deutsch Speicher Programmierbare Steuerung oder SPS) dient zur Anpassung der numerischen Steuerung an konkrete Werkzeugmaschinentypen. Dies wird auch Anpasssteuerung genannt. Ihre Aufgabe

ist es, Steuerungssignale zu entschlüsseln, logische Verknüpfungen durchzuführen und maschinenspezifische Funktionsabläufe zu steuern. Die SPS übernimmt somit die Steuerung und Überwachung aller Verriegelungs- und Verknüpfungsaufgaben. Einige Funktionen, die immer gleich bleiben, wie z.B. der Werkzeugwechsel, werden von der CNC durch einen Schaltbefehl nur angestoßen. Der weitere Ablauf erfolgt automatisch, schrittweise gesteuert und überwacht durch die SPS. Ist dieser Vorgang fehlerfrei beendet, schickt die SPS ein Signal an die CNC, die den Ablauf des NC-Programms fortsetzt (vgl. [5] Seite 36ff).

## 2.2 Betriebsdatenerfassung

Als Betriebsdaten bezeichnet man im engeren Sinn die im Laufe des Produktionsprozesses anfallenden Daten, wie produzierte Mengen, benötigte Zeiten, Zustände von Fertigungsanlagen, Lagerbewegungen oder Qualitätsmerkmale sowie eine zur Identifikation benötigte Nummer (vgl. [6] Seite 298). Es wird zwischen organisatorischen und technischen Betriebsdaten unterschieden (vgl. [7] Seite 82f). Die Einteilung der Betriebsdaten ist mit zugehörigen Beispielen in Tabelle 1 ersichtlich.

**Tabelle 1: Einteilung der Betriebsdaten mit Beispielen (vgl. [8] Seite 182)**

Betriebsdaten			
Organisatorische Betriebsdaten		Technische Betriebsdaten	
Auftragsdaten	Personaldaten	Maschinendaten	Prozessdaten
Produktionsdaten Arbeitsfortschritt Auftragsstatus Rückmeldung auftragsbezogener Arbeitsleistungen mit Bezug auf einzelne Arbeitsvorgänge	Anwesenheit Arbeitszeit personenbezogene Arbeitsleistungen	Laufzeiten Störungen Energie- verbrauch Immissionswerte Betriebs- zustände	Qualität Prozessparameter

Die Betriebsdatenerfassung (BDE) umfasst Maßnahmen, die erforderlich sind, um Betriebsdaten eines Produktionsbetriebs in maschinell verarbeitungsfähiger Form am Ort ihrer Verarbeitung bereitzustellen (vgl. [9] Seite 290).

Werden die Daten automatisch an den Produktionsanlagen erfasst, spricht man von Maschinendatenerfassung (MDE). Dabei werden die Daten entweder direkt aus der Anlagensteuerung ausgelesen (z.B. bei CNC-Maschinen) oder über spezielle Sensoren ermittelt (z.B. bei einem Transportband). Typische Daten, die auf diese Weise gewonnen werden können, sind Umdrehungszahlen, Zeitdauern, Temperaturen, etc. Da zunehmend automatische Erfassungstechnologien eingesetzt werden, verwendet man die Begriffe BDE und MDE heute oft in Kombination (BDE/MDE) (vgl. [6] Seite 298). Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere die Erfassung der folgenden Betriebsdaten von Relevanz:

- Betriebszustände von Werkzeugmaschinen
- Energiedaten von Werkzeugmaschinen

In weiterer Folge spielt die zeitliche Überlagerung dieser beiden Faktoren eine bedeutende Rolle. Im Folgenden wird daher insbesondere auf die Möglichkeiten der Erfassung dieser beiden Betriebsdaten eingegangen.

### **2.2.1 Betriebszustände von CNC-Werkzeugmaschinen**

Um Aussagen über das energetische Verhalten von Fertigungsanlagen tätigen zu können, ist es sinnvoll, Betriebszustände einzelner Werkzeugmaschinen zu definieren. Je nach Maschinenspezifikation können im Betrieb verschiedene Zustände auftreten. Mögliche Betriebszustände einer CNC-Maschine (Ressource) sind nachfolgend aufgelistet (vgl. [10] Seite 75f):

- **Bearbeitung:** In diesem Zustand arbeitet die Ressource. Dieser Zustand bleibt so lange erhalten, bis die Bearbeitungszeit überschritten ist oder eine Störung eintritt.
- **Hochlauf:** Während des Hochlaufens (auch Warm-Up-Vorgang) wird die Ressource in Betriebsbereitschaft (z.B. auf Betriebstemperatur) gebracht.
- **In Regelung:** In diesem Zustand ist die Ressource betriebsbereit und wartet auf ein zu bearbeitendes Werkstück. Gründe dafür können z.B. eine Störung oder eine höhere Taktzeit der vorgelagerten Ressource sein.
- **Blockiert:** Kann eine Ressource nicht produzieren, da kein Werkstückabtransport stattfindet, wird sie als blockiert bezeichnet. Dies ist der Fall wenn z.B. die nachfolgende Ressource gestört bzw. der Puffer voll ist.
- **Störung:** Dieser Zustand beschreibt die Arbeitsunfähigkeit einer Ressource aufgrund eines Fehlers der Ressource selbst. Mögliche Ursachen dieser Störzeiten sind Werkzeugbrüche, Verklemmungen, etc.
- **Setup:** In diesem Zustand wird die Maschine eingefahren und arbeitet nicht. Dieser Zustand tritt z.B. bei einer Änderung des NC-Programms, während des Rüstens oder während eines Teilewechsels ein.

- Not-Aus: Bei einer Betätigung der Not-Aus-Einrichtung geht die Ressource in einen genau definierten sicheren Zustand.
- Aus: In diesem Zustand ist die Ressource ausgeschaltet und steht nicht sofort (erst nach Hochlauf) zur Verfügung.

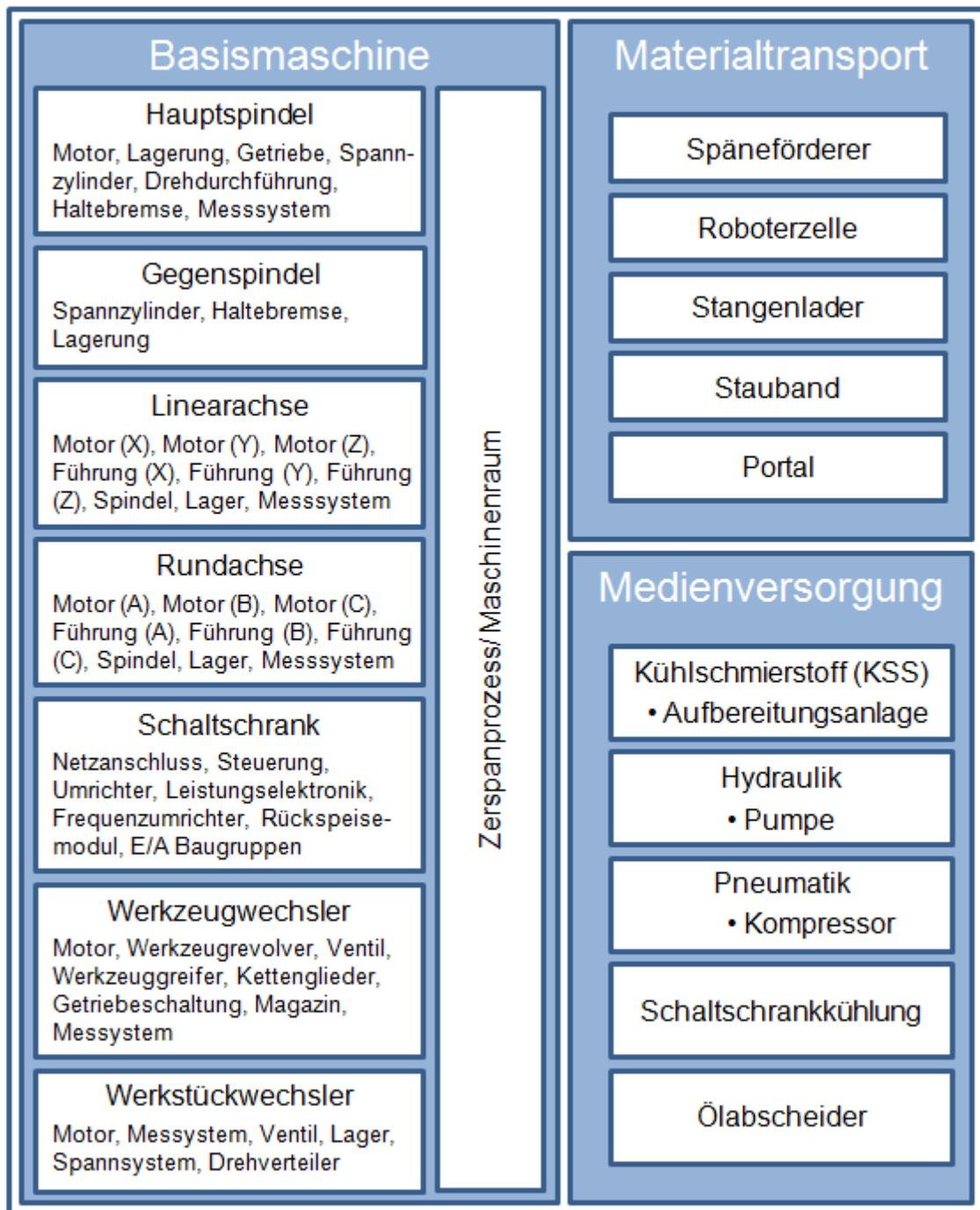
Hierbei ist zu beachten, dass eine spezifische Anpassung oder Erweiterung der gegebenen Definitionen möglich ist. Außerdem müssen nicht alle genannten Zustände bei einer Ressource vorhanden sein, da speziell ältere Maschinen häufig nicht über solch eine Vielzahl an möglichen Zuständen verfügen.

Die automatische Erfassung von Betriebszuständen kann generell über verschiedene Methoden erfolgen. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den folgenden zwei Methoden:

1. Erfassung der Betriebszustände über Signale aus der Werkzeugmaschinensteuerung
2. Ermittlung der Betriebszustände über das energetische Verhalten spezieller Komponenten der Werkzeugmaschine (z.B. Leistungsaufnahme oder Druckluftverbrauch)

## **2.2.2 Erfassung der Betriebszustände über Leistungsniveaus**

In diesem Kapitel soll ein Ansatz vorgestellt werden, mit dem es möglich ist, den aktuellen Betriebszustand einer Maschine z.B. anhand ihrer aktuellen Leistungsaufnahme oder der aktuellen Leistungsaufnahme ihrer Komponenten zu bestimmen. Daneben wäre aber auch eine Bestimmung der Betriebszustände über den Druckluftverbrauch oder die Temperatur einzelner Komponenten denkbar. Für den leistungsbezogenen Ansatz ist es zunächst nötig, die Subsysteme und die Komponenten einer Werkzeugmaschine zu definieren. Grundsätzlich ist als System eine Menge von Elementen zu verstehen, welche über Beziehungen (Relationen) miteinander verknüpft sind. Durch das Zusammenwirken der Elemente erfüllt das System eine übergeordnete Funktion. Ob ein gewisses Element zu einem System gehört oder nicht, wird durch seinen Beitrag zur Funktionserfüllung des Systems bestimmt (vgl. [11] Seite 142). In Abbildung 4 sind die Komponenten einer Werkzeugmaschine ersichtlich. Jede Komponente leistet dabei einen Beitrag zur Wandlung der in das System eingebrachten Energie und besitzt einen Wirkungsgrad. Um die Effizienz der Werkzeugmaschine zu optimieren, muss die Summe dieser Wirkungsgrade ein Maximum erreichen (vgl. [12] Seite 6).



**Abbildung 4: Subsysteme einer Werkzeugmaschine (vgl. [12] Seite 6)**

Die Grundlage für die Darstellung der Betriebszustände über die Leistungsaufnahme bildet ein in [13] dargestellter zustandsbasierter Ansatz. Dieser Forschungsansatz verfolgt das Ziel, die Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine über das Verhalten der Maschine in bestimmten Betriebszuständen zu modellieren. Hierbei wird angenommen, dass den jeweiligen Betriebszuständen typische, annähernd konstante Leistungsniveaus zuordenbar sind. Dabei können sowohl die Zustände als auch die Übergänge zwischen den Zuständen abgebildet werden. In Abbildung 5 sind die angenommenen Betriebszustände und mögliche Übergänge dargestellt.

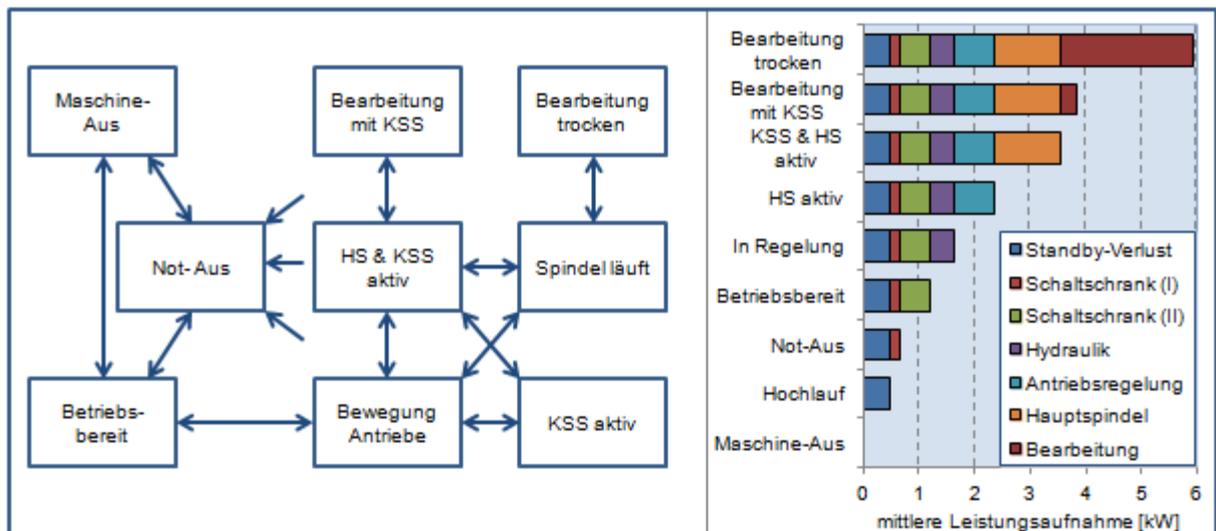


Abbildung 5: Betriebszustände und Leistungsaufnahme der Komponenten (vgl. [13] Seite 641)

Im Modell werden nun den möglichen Zuständen die Leistungsaufnahmen derjenigen Komponenten zugeordnet, welche in den jeweiligen Zuständen aktiv sind. Je nach Detaillierungsgrad des zustandsbasierten Modells können Zustände hinzugefügt oder entfernt werden. Ein einfaches Modell würde sich mit nur wenigen Zuständen, wie beispielsweise „aus“, „Not-Aus“ und „Bearbeitung“, ergeben. Es wäre aber auch denkbar, alle in Kapitel 2.2.1 definierten Zustände abzubilden bzw. diese Zustände je nach Anforderung sogar noch näher zu unterteilen. Der Zustand „Bearbeitung“ könnte dabei beispielsweise noch in Schlicht- und Schruppbearbeitung, jeweils mit und ohne Kühlschmierstoff (KSS) unterschieden werden (vgl. [14] Seite 255ff).

Mit der Zuordnung von Leistungsniveaus zu bestimmten Betriebszuständen wird anhand des vorliegenden Zustandsmodells der Grundstein für eine Vorhersage der elektrischen Leistungsaufnahme geschaffen. Im umgekehrten Schluss lassen sich mit der Grundidee dieses Ansatzes über gemessene Leistungsniveaus aktuelle Betriebszustände einer Maschine ermitteln. Damit ist es möglich, über Leistungs- oder Druckluftmessungen an bestimmten Maschinenkomponenten und unter Kenntnis von Erfahrungswerten, Aussagen über den aktuellen Betriebszustand der Anlage zu machen. Durch die Datenspeicherung ist zudem die Aufnahme und Auswertung des zeitlichen Verlaufs dieser Zustände möglich.

### 2.2.3 Erfassung der Betriebszustände über Steuerungsdaten

Die Maschinendatenerfassung über die Steuerung kann grundsätzlich über die folgenden Wege realisiert werden (vgl. [15] Seite 469):

- Signalerfassung mit Wandler
- Signalerfassung über herstellereigentliche Protokolle
- Steuerung mit Server

Die Wahl der jeweiligen Anbindung ist dabei prinzipiell abhängig von den zu überwachenden Maschinen, dem gewünschten Detaillierungsgrad der Daten und dem zur Verfügung stehenden Budget.

Die Signalerfassung mittels Wandler kommt bei Maschinen zum Einsatz, welche über keinen Kommunikationsprozessor verfügen. Hierzu wird ein Feldbus-Koppler im Steuerungsschrank der Maschine installiert. Seine Aufgabe besteht in der über Ethernet realisierten Verbindung des Systems mit weiteren Netzwerkteilnehmern (vgl. [16] Seite 17). Die benötigten Signale werden aus der Maschinensteuerung über die digitalen Signalausgänge ausgelesen und in den Wandler eingegeben. Dieser sorgt für die nötige Ethernet-Konvertierung.

Bei neueren Maschinen ist die Signalerfassung über herstellereigentliche Protokolle möglich. Sie sind bereits mit einem Prozessor und einer Software zur Kommunikation ausgerüstet. Bei diesen Anlagen können die Daten direkt aus der Maschinensteuerung ausgelesen werden. Zudem stehen zahlreiche weitere Funktionen und Daten zur Verfügung. So lässt sich auch die Übertragung von NC-Programmen zur Maschine realisieren oder die aktuelle Werkzeugbelegung abfragen (vgl. [15] Seite 470).

Bei der Steuerung mit einem Server erfolgt die Datenaufbereitung schon in den Anlagen. In jeder Maschine wird hierzu ein zusätzlicher Rechner, in der Regel ein PC bereitgestellt. Auf diesem laufen Programme, die schon einen Teil der Datenaufbereitung, wie etwa eine einheitliche Formatierung, übernehmen. Die Datenweiterleitung erfolgt über Ethernet. Zusätzliche Rechner und Programme sind zwar kostenrelevant, dafür lassen sich jedoch komplexe Größen und Prozesse gut darstellen. Der zentrale Vorteil liegt hierbei bei den offenen Kommunikationsprotokollen, die es möglich machen, integrierte und effiziente Fertigungssysteme zu organisieren und die Produktion damit nachhaltig zu optimieren. Als Standardkommunikation für die Maschinensteuerung via Server hat sich OPC (OLE for Process Control) etabliert. OPC ist frei konfigurierbar, lediglich die Syntax, auf Basis derer zwei Maschinen miteinander kommunizieren ist geregelt. Der Umfang der zu kommunizierenden Daten ist individuell zu regeln (vgl. [15] Seite 470f).

Die über diese Methoden ausgelesenen Maschinensignale entsprechen jedoch noch nicht jenen Informationen, die für eine Betriebsdatenerfassung benötigt werden. Die Signale müssen im Folgenden aufbereitet, verknüpft und interpretiert werden. Für die Verknüpfung der Signale werden Logikbausteine benötigt, deren Aufgabe darin besteht, aus einer Vielzahl von Signalen und ggf. zusätzlichen Informationen die gewünschten Betriebszustände abzuleiten. Zudem ist die Ausgabe zu vereinheitlichen und von der Art und Ausprägung der Maschine zu abstrahieren. Vereinheitlichte Betriebszustände für die Fertigung sind hierbei beispielsweise:

- Bearbeitung
- Störung
- Not-Aus

Die Verarbeitung erfolgt, wie in Abbildung 6 ersichtlich ist, in zwei Stufen. Zunächst werden den Maschinensignalen logische Namen zugeordnet und hieraus mittels Verknüpfungen durch eine Scriptsprache die entsprechenden Betriebszustände ermittelt (vgl. [15] Seite 471f).

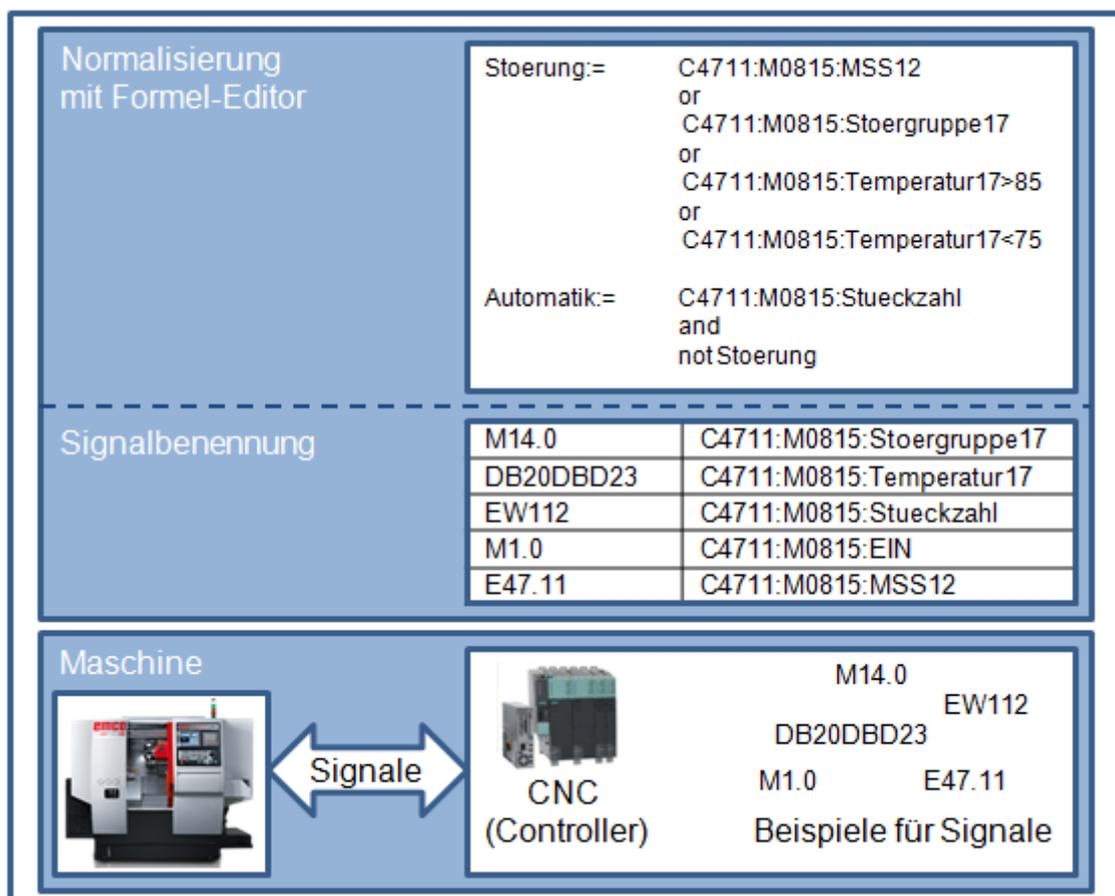


Abbildung 6: Verarbeitung von Maschinensignalen (vgl. [15] Seite 471)

Die Signale an einer Maschine lassen sich in folgende Gruppen einteilen (vgl. [15] Seite 473f).

- Sicherheit
- Prozess & Bedienung
- Visualisierung

Die Gruppe der Sicherheitssignale beinhaltet alle Signale, die für die Betriebssicherheit relevant sind (z.B. „Not-Aus“). Charakteristisch für Signale dieser Gruppe ist zudem, dass das Vorliegen eines Sicherheitssignals unmittelbar mit der Information verbunden ist, dass die Maschine nicht produziert.

In der Gruppe Prozess und Bedienung werden Funktionen zusammengefasst, die zum Steuern einer Maschine benutzt werden. Die Komplexität dieser Signale reicht von einfachen binären Signalen, wie beispielsweise „KSS ein/aus“ bis zu sehr komplexen Befehlen (z.B. „Halt nach Taktende“). Derartige Befehle werden durch eine Verknüpfung von Einzelbefehlen ausgelöst und sind zeitgleich im Bearbeitungskanal der NC wirksam.

In der Signalgruppe Visualisierung finden sich Signale, die keinen direkten Einfluss auf den Prozess haben und lediglich zum Informationsaustausch mit dem Bediener genutzt werden. Ein Beispiel wäre das Signal „Teil im Arbeitsraum fertig bearbeitet“. Auch das Signal „Störung an der Maschine liegt an“ zählt zur Gruppe der Visualisierung. Bei Störungen ist die Auswirkung stark abhängig vom Bearbeitungsprozess. So kann in manchen Fällen ein Teil fertig bearbeitet werden, in anderen wird die Bearbeitung mit einem Eingriff in den Prozess unterbrochen (vgl. [15] Seite 474).

## 2.2.4 Energiedatenerfassung

Die Aufnahme relevanter Energiedaten eines Prozesses kann als zentraler Ausgangspunkt zur Erreichung des Ziels einer energieeffizienten Produktion angesehen werden. So kann ohne Kenntnis der Ist-Situation, also der Ausgangslage, kein effizienter Weg zu mehr Energieeffizienz gefunden werden (vgl. [17] Seite 86). In der Produktionstechnik werden unter Leistungs- und Energieverbrauch meist elektrische Kenngrößen verstanden, deren Definition nachfolgend gegeben werden soll.

Die elektrische Energie ergibt sich aus dem Integral des Produktes der elektrischen Spannung  $u(t)$  und des elektrischen Stromes  $i(t)$  über der Zeit  $t_1 - t_0$ :

$$E = \int_{t_0}^{t_1} u(t) \cdot i(t) dt \quad (1)$$

In dieser Arbeit wird unter der elektrischen Leistung die Wirkleistung  $P$  verstanden. Die Wirkleistung ist die Leistung, welche für eine Umwandlung in andere Leistungen (z.B. mechanische) zur Verfügung steht.

Die Augenblicksleistung errechnet sich aus dem Produkt von elektrischer Spannung  $u(t)$  und der Stromstärke  $i(t)$ . Für den allgemeinen Fall von veränderlichen Werten der Spannung und Stromstärke wird die Wirkleistung über eine Mittelwertbildung der Augenblicksleistung berechnet (vgl. [18]).

$$P = \bar{p} = \overline{u \cdot i} \quad (2)$$

Der zeitliche Verlauf der aufgenommenen elektrischen Leistung wird als Lastganglinie bezeichnet. Generell sind Ganglinien die grafische Darstellung von Messwerten in ihrer chronologischen Reihenfolge. Die Darstellung erfolgt in einem kartesischen Koordinatensystem, in welcher der jeweilige Wert über die Zeit aufgetragen wird. Sind die Messwerte einer Periode nach ihrer Größe sortiert dargestellt, wird dies als Dauerlinie bezeichnet (vgl. [19] Seite 268).

Messtechnisch setzt sich die Leistungsbestimmung aus einer Spannungsmessung und einer Strommessung zusammen. Während die Spannungsmessung parallel, also ohne Auftrennen des Stromkreises erfolgen kann, muss für eine Strommessung der Stromkreis üblicherweise aufgetrennt werden. Bei Gleichspannung sowie bei einphasigem Wechselstrom mit 230V ist eine derartige Auftrennung relativ einfach möglich. Bei dreiphasigem Wechselstrom, welcher üblicherweise in der Industrie für die Versorgung von Maschinen und Anlagen benötigt wird, kann ein derartiger Eingriff mit einem entsprechend höherem Aufwand verbunden sein. Zudem muss zwischen Blind- und Wirkleistung unterschieden werden (vgl. [20] Seite 87):

$$P = U I \cos \varphi \quad (3)$$

$$Q = U I \sin \varphi \quad (4)$$

Die Verbraucher können bei Verwendung von dreiphasigem Wechselstrom sowohl in Stern- als auch Dreieckschaltung angeschlossen werden. Bei der Sternschaltung ergeben sich dabei insgesamt sechs unterschiedliche Spannungen, wobei  $U_1, U_2, U_3$  als Sternpunktspannungen und  $U_{21}, U_{23}, U_{31}$  als Leiter-Leiter-Spannungen oder auch verkettete Spannungen bezeichnet werden. Die Leiter-Leiter-Spannungen ergeben sich aus den Sternpunkt- oder Strangspannungen zu:

$$U_{Leiter} = \sqrt{3} U_{Strang} \quad (5)$$

Da diese Leiter-Leiter-Spannungen direkt an den Anschlusspunkten abgegriffen werden können, werden sie in der Regel auch für eine Leistungsmessung herangezogen

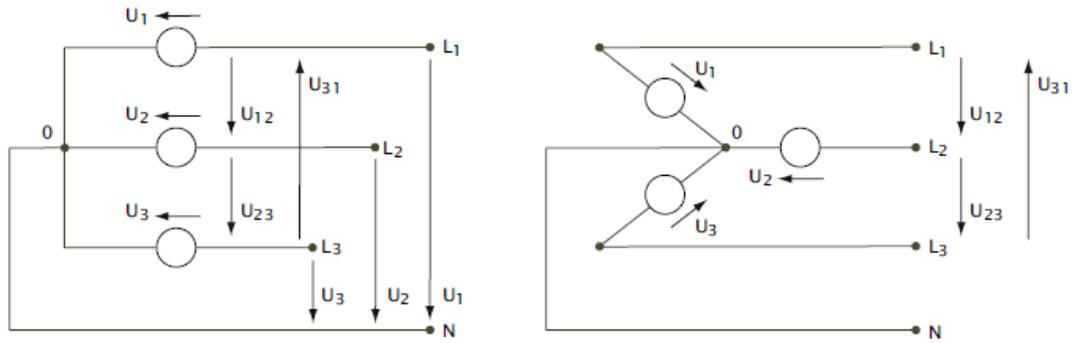


Abbildung 7: Sternschaltung (vgl. [20] Seite 87)

Da der Leiterstrom auch durch den Strang fließt, gilt bei der Sternschaltung:

$$I_{Leiter} = I_{Strang} \quad (6)$$

Bei der Dreieckschaltung sind die Strang- und Leiterspannungen gleich, es gibt nur drei unterschiedliche Spannungen. Damit gilt:

$$U_{Leiter} = U_{Strang} \quad (7)$$

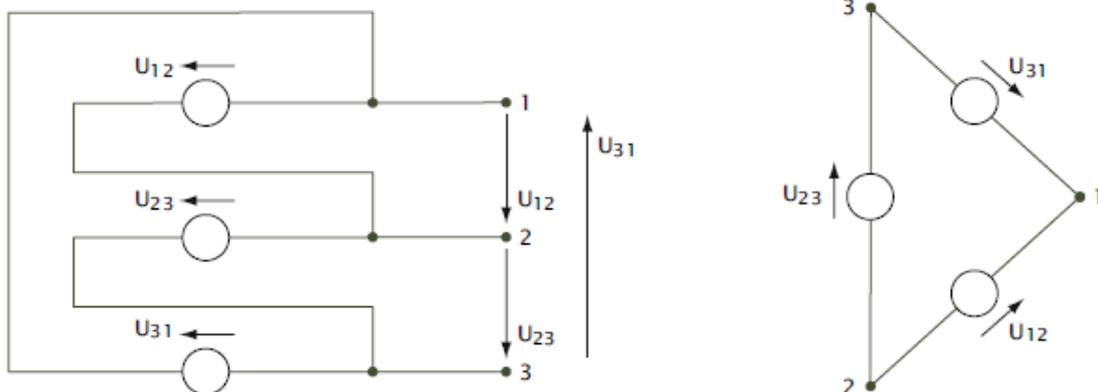


Abbildung 8: Dreieckschaltung (vgl. [20] Seite 87)

Die Ströme errechnen sich zu:

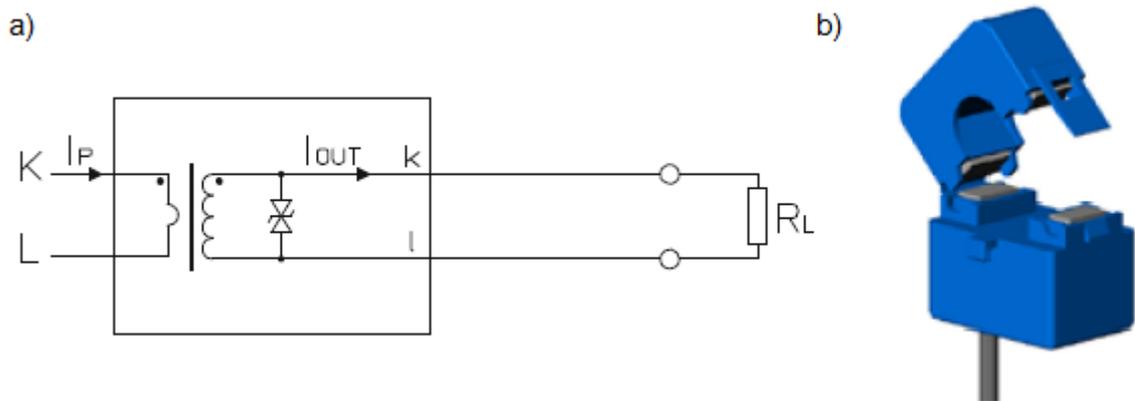
$$I_{Leiter} = \sqrt{3} I_{Strang} \quad (8)$$

Zur Bestimmung der Gesamtleistung müssen nun für jede Phase (für jeden Strang) die Einzelleistungen bestimmt werden, um diese zu einer Gesamtleistung aufsummieren zu können. Bei Produktionsmaschinen liegt in der Regel eine symmetrische Belastung vor, wobei jede Phase mit der gleichen Leistung belastet ist.

Insofern ergibt sich die Gesamtleistung zu:

$$P_{ges} = 3U_{Strang} I_{Strang} = \sqrt{3}U_{Leiter} I_{Leiter} \quad (9)$$

Die Spannungen können daher sehr einfach an den Anschlussklemmen abgegriffen werden, wobei bei symmetrischer Belastung die Messung von Spannung und Strom an einer Zuleitung genügt. Um die Ströme zu bestimmen, bleibt jedoch das Problem der Reihenschaltung, die ein Öffnen der Stromkreise, also ein Abklemmen, erfordert. Dies kann durch die Verwendung von Induktionsklemmen umgangen werden (vgl. [20] Seite 87ff).



**Abbildung 9: Prinzip eines Stromwandlers (links), Beispiel eines Stromwandlers (rechts) [21]**

Induktionsklemmen sind eine spezielle Form von Stromwandlern. Stromwandler können praktisch als im Kurzschluss arbeitende Transformatoren betrachtet werden. Der Bemessungsstrom wird in die Primärwicklung eingepreßt und der Sekundärstrom niederohmig gemessen. Die Primärwicklung muss dabei für den Nennstrom ausgelegt sein und besteht bei hohen Strömen oft nur aus wenigen Wicklungen. Die Sekundärwicklung darf, aufgrund einer möglichen Überspannung nicht offen betrieben werden. Für Stromwandler wird das Übersetzungsverhältnis  $K_1$  angegeben, welches als Verhältnis von Primär- zu Sekundärstrom definiert ist (vgl. [22] Seite 117).

$$K_1 = \frac{I_1}{I_2} \quad (10)$$

Im einfachsten Fall bestehen Induktionsklemmen aus einer Spule mit Windungszahl  $w$  und einem zu öffnenden Ringkern. Wird ein Leiter, an welchem ein Strom gemessen werden soll, in den Ringkern eingeführt, entsteht ein Übertrager mit dem Wicklungsverhältnis  $1:w$  (vgl. [22] Seite 117).

## 2.2.5 Auswahl der Messgeräte

Da in der modernen Produktionstechnik fast ausnahmslos die Anforderung einer Generierung von Messdaten in elektronisch verarbeitbarer Form besteht, werden physikalische Messdaten üblicherweise mit Aufnehmern erfasst und anschließend in Signale überführt, welche digital umgewandelt werden können (vgl. [14] Seite 210). Dieses Prinzip wird in Abbildung 10 veranschaulicht.

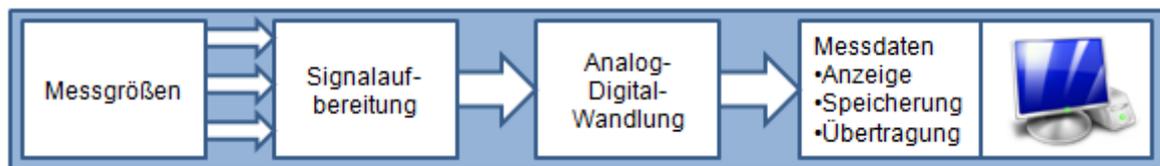


Abbildung 10: Generierung von Messdaten anhand von Messgrößen (vgl. [14] Seite 210)

Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden Messtechnik und Rechenleistung können Analogwerte in hoher Auflösung in digitale Messdaten übergeführt werden, ohne Nachteile gegenüber der analogen Darstellung zu erfahren.

Für die Aufnahme der elektrischen Grundgrößen werden Messwandler nach entsprechenden Normen herangezogen. Sie sind meist als Messtransformatoren zur Anpassung der Messbereiche von Spannungs-, Strom und Leistungsmessung in Wechselstromnetzen ausgeführt.

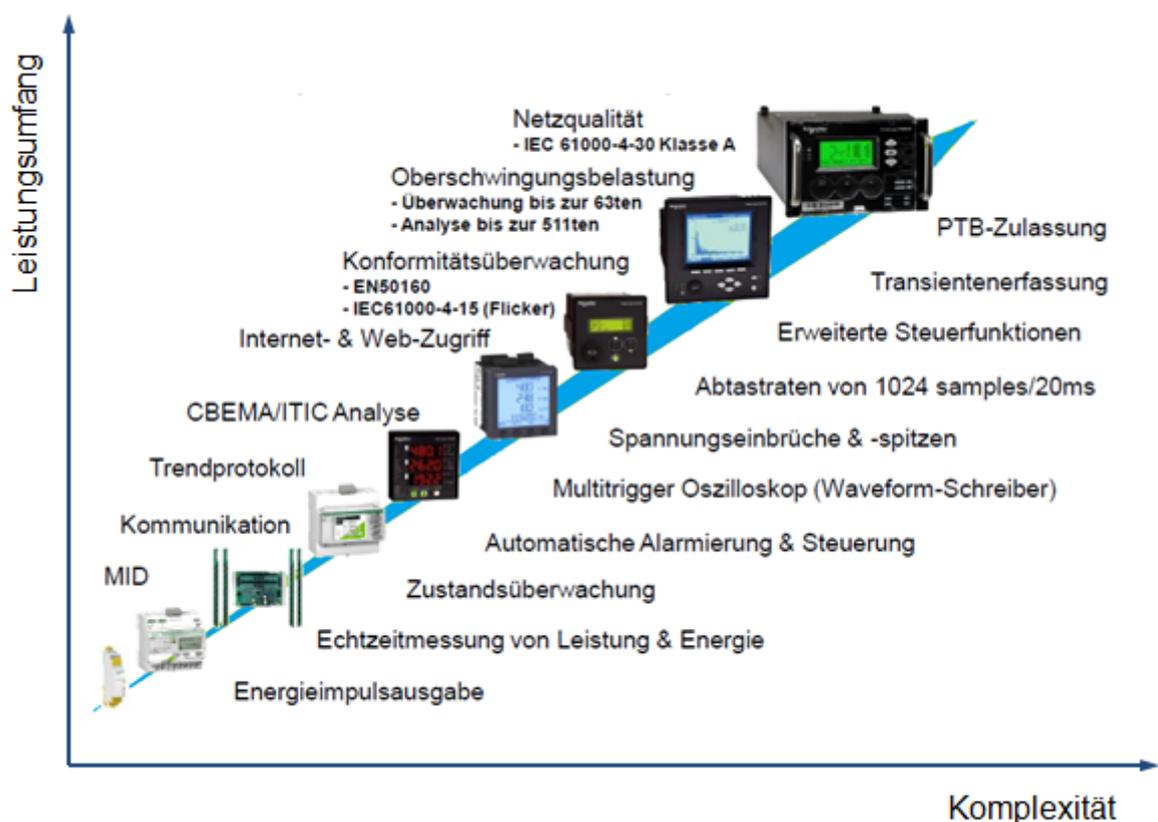
Während der Signalaufbereitung werden die Rohsignale der Wandler verstärkt und/oder in Standardsignale übergeführt, welche für die Automatisierungs- bzw. Messtechnik maßgeblich sind. In Form dieser Standardsignale sind die Messdaten in alle gängigen Messtechnik- und Automatisierungssysteme integrierbar. In diesen Geräten erfolgt dann die Analog-Digital-Wandlung, nach welcher die Messdaten als diskontinuierliche und zeitdiskrete Zahlenwerte zur Verfügung stehen (vgl. [14] Seite 212).

Der Markt stellt eine Vielzahl an Geräten für die messtechnische Erfassung von Energiedaten zur Verfügung. Die Auswahl dieser Geräte obliegt der Strategie des Unternehmens bzw. der jeweiligen Anwendung und muss individuell angepasst werden. Es kann hierbei grob in Geräte für den mobilen Gebrauch und fest installierte Messgeräte unterschieden werden.

Für mobile, temporäre Messungen eignet sich im betrieblichen Umfeld vor allem der Multimeter-Datenlogger. Als Messwertaufnehmer kommen bei der Messung im Dreiphasenwechselstromkreis Wechselstromzangen in Verbindung mit Spannungsklemmen zum Einsatz. Aus den gemessenen Stromstärken und Spannungen werden nach geräteinterner Signalumwandlung vom Prozessor vordefinierte Werte berechnet. Hier kommt meist eine geräte- oder herstellerspezifische Software zum Einsatz. Die Messwerte können direkt am Gerät

angezeigt, im Datenlogger gespeichert und/oder an einen PC gesendet werden. Am PC können die Daten bearbeitet und grafisch aufbereitet werden. Dazu kommen Standardprogramme (Tabellenkalkulation, Datenbanken, etc) zur Anwendung (vgl. [19] Seite 276ff).

Neben der mobilen Bauform besteht die Möglichkeit, fest installierte Geräte, welche für den Verbleib an der Messstelle konzipiert sind, zu nutzen. Der Funktionsumfang dieser Geräte ist derart angepasst, dass sie sich zur dauerhaften Überwachung energetisch relevanter Größen in Maschinen und Anlagen eignen. Ihr Einbau erfolgt typischerweise im Gehäuse der Maschine. In der Regel erfolgt der spannungsseitige Anschluss direkt am Niederspannungsnetz. Für die Strommessung werden wiederum Stromwandler verwendet. Der Umfang an Mess-, Rechen- und Archivierungsfunktionen ist je nach Ausbaustufe unterschiedlich. Die Informationen können über ein Display direkt vom Gerät abgenommen oder über Netzwerkschnittstellen an ein Softwaresystem übertragen werden (vgl. [14] Seite 213).



**Abbildung 11: Dedizierte Messgeräte - Energiezähler, Universalmessgeräte und Netzanalysatoren (vgl. [17] Seite 89)**

Wie in Abbildung 11 ersichtlich wird, kann der Funktionsumfang solcher Geräte als sehr breit angesehen werden. Er reicht von Strommessungen über kontinuierliche Erfassung von Energiedaten bis hin zu Diagnosefunktionen sowie der Überwachung der Netzqualität (vgl. [17] Seite 91). Leistungsanforderungen, Komplexitätsverständnis und Kosten spielen generell bei der Auswahl von

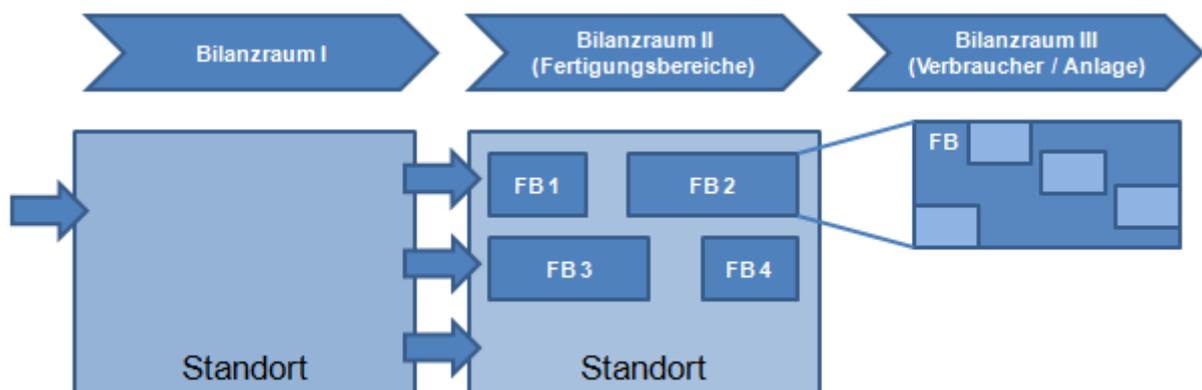
Messgeräten eine entscheidende Rolle. Aus diesem Grunde ist es wichtig, vor der Realisierung eines Messkonzeptes die Erwartungen an ein Energiemesssystem zu konkretisieren und eine umfangreiche Energieerfassungs-Strategie zu erarbeiten. Dabei sind beispielsweise folgende Punkte zu klären:

- Wie genau muss die Auflösung der Daten sein?
- Welche Punkte sollen erfasst werden?
- Welches Budget steht zur Verfügung?
- Welche Möglichkeit zur Einbindung in vorhandene Systeme muss gegeben sein?
- Welche zusätzlichen Anforderungen an das Messsystem (z.B. Zustandsüberwachung und Netzqualität) werden gestellt?

Um zu entscheiden, welche Energieströme erfasst werden sollen, ist es sinnvoll, die Produktion in Teilbereiche zu untergliedern. Dies hilft, die Übersicht über das zu messende System zu schaffen und potentielle Messstellen zu identifizieren. Große Unternehmen untergliedern ihre Produktionen beispielsweise in die folgenden drei Ebenen (vgl. [20] Seite 91):

- Standort
- Fertigungsbereich (z.B. Gieserei oder Karosseriebau)
- Einzelverbraucher

Diese drei Ebenen sind in Abbildung 12 dargestellt.

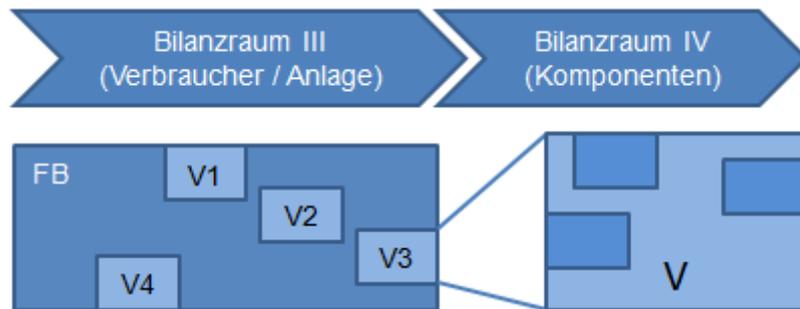


**Abbildung 12: Gliederung von Produktionsstandorten (vgl. [23] Seite 12)**

Die Wahl der Untergliederung kann mit übergeordneten Überlegungen verbunden sein. Eine Möglichkeit wäre es, sich dabei an vorhandenen Kostenstellen zu orientieren. Auf diese Weise können im Betrieb Kostenstellenverantwortliche über Zielvereinbarungen in Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz eingebunden werden (vgl. [20] Seite 92).

Der Detaillierungsgrad ist, sofern es die jeweilige Messaufgabe verlangt, beliebig erweiterbar. So kann es sinnvoll sein, Messpunkte innerhalb des Systems der

einzelnen Verbraucher zu setzen, um damit die Leistungsaufnahme einzelner Komponenten (vgl. Abbildung 3, Kapitel 2.1) eines Verbrauchers zu erfassen. Eine derartig mögliche Erweiterung ist in Abbildung 13 veranschaulicht.



**Abbildung 13: Erweiterung der Messaufgabe**

Ein wesentlicher Erfolgsfaktor einer Messstrategie ist ein methodisches Vorgehen bei der Auswahl von Messpunkten. Dabei muss auf die Relevanz der Messdaten und die wirtschaftliche Realisierbarkeit des Messvorhabens geachtet werden. Vor diesem Hintergrund gilt bei der Implementierung von Messtechnik, "nicht so viel wie möglich, sondern so viel wie nötig" (vgl. [20] Seite 92).

Zur Identifizierung energetischer Hotspots bietet sich die Energie-Portfolio-Analyse an. Mit Hilfe dieses Werkzeugs können energetische Verbraucher in kritische und unkritische Verbraucher eingeteilt werden. Kritische Verbraucher werden in weiterer Folge einer tiefergehenden Mikro-Analyse unterzogen, welche aus messtechnikunterstützten Ansätzen zur Leistungs-, Zeit- und Parameteranalyse von Prozessen, Maschinen oder Anlagen bestehen kann (vgl. [24] Seite 15).



Abbildung 14: Energieportfolio (vgl. [24] Seite 15)

Die Energie-Portfolio-Analyse ist eine Methode zur schnellen Strukturierung von energetischen Verbrauchern in Unternehmen. Wie in Abbildung 14 dargestellt, werden die Verbraucher auf Basis von Anschlusswerten und Laufzeiten in vier Kategorien eingeteilt, mit denen Handlungsempfehlungen zu weiteren Detailanalysen abgeleitet werden können. Diese systematische Vorgehensweise unterstützt dabei, den Fokus auf energetische Treiber zu setzen. Über die Aktualisierung mit gemessenen Werten eignet sich diese Methode auch zur kontinuierlichen Anwendung (vgl. [24] Seite 15).

Nach der Identifizierung der relevanten Messstellen muss die Auflösung der Messdaten definiert werden. An Messstellen innerhalb der energetischen Verteilerstrukturen sind hohe zeitliche Auflösungen nur selten notwendig. In den Ästen der Verteilerstruktur werden für die Detailmessungen zur Ableitung technischer Effizienzmaßnahmen oft hochauflösende Messdaten benötigt. Ist die Auflösung zu niedrig, können keine Rückschlüsse auf Einzelverbraucher oder Komponenten gezogen werden (vgl. [24] Seite 21). In Abbildung 15 ist ein Lastgang in verschiedenen Auflösungen dargestellt.

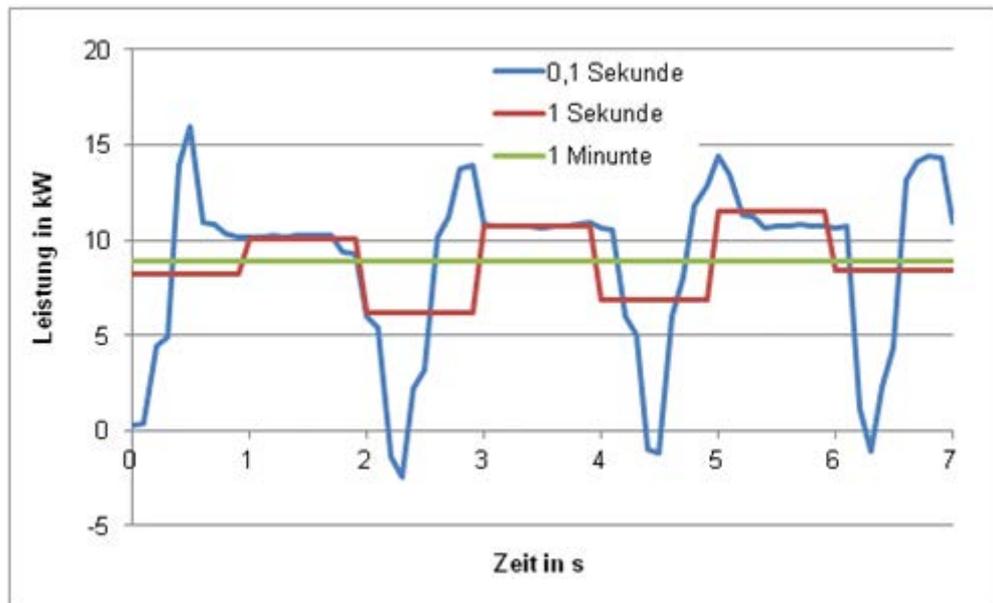


Abbildung 15: Messdaten in unterschiedlichen Auflösungen

## 2.3 Modellierung der Energieaufnahme

In diesem Kapitel wird die Modellierung des Energiebedarfs von Werkzeugmaschinen beschrieben. Dabei wird nach der Definition grundlegender Begriffe auf ausgewählte Ansätze in der Forschung eingegangen, um hierdurch die Vorgehensweise bei der Modellbildung zu veranschaulichen.

### 2.3.1 Der Modellbegriff und grundlegende Aspekte von Modellen

Bei einem Modell handelt es sich um eine abstrahierte Abbildung eines zu untersuchenden Systems, welches entweder bereits existiert oder zukünftig entstehen soll. Dabei bedeutet Abstraktion der Modellierung, dass im Modell die Struktur oder das Verhalten des Systems mit einem geringeren Detaillierungsgrad beschrieben werden, als beim realen System (vgl. [25] Seite 13). Ein Modell ist demnach ein Mittel, um einen Zusammenhang zu veranschaulichen, wobei wesentliche Sachverhalte dargestellt und unwesentliche vernachlässigt werden (vgl. [26] Seite 4). Energieverbrauchsmodelle eignen sich zum Einsatz bei der Energieverbrauchsvorhersage bei der Prozess- und Produktionsplanung und in Energiemonitoren an der Maschine. Neben der reinen Darstellung ergibt sich durch den Einsatz von Modellen auch die Möglichkeit, mittels der Analyse von Fertigungs- oder Planungsvariationen den Energieverbrauch zu optimieren (vgl. [14] Seite 253).

Innerhalb des Modellierungsprozesses gibt es zwei Fragestellungen, die immer wieder zum Tragen kommen (vgl. [27] Seite 125):

- Welcher Modellierungsansatz ist für die Erstellung des Modells am angebrachten?
- Welcher Detaillierungsgrad ist für die einzelnen Modellkomponenten zweckmäßig?

Beim typischen Verlauf der Leistungsaufnahme einer Werkzeugmaschine bietet sich beispielsweise ein zustandsbasierter Ansatz zur Abbildung des Energiebedarfs an. In Abhängig von der gewünschten Genauigkeit des Ergebnisses kann der Detaillierungsgrad der Modelle variiert werden, wobei eine Verbesserung der Genauigkeit sowohl den Modellierungsaufwand als auch die benötigte Rechenzeit erhöht (vgl. [14] Seite 254).

Die typischerweise bei der Systemanalyse verwendeten Vorgehensweisen zur Modellierung können in folgende Methoden unterschieden werden (vgl. [28]):

- Top-Down-Methoden
- Bottom-Up-Methoden
- Middle-Out-Methoden

Beim Top-Down-Entwurf wird üblicherweise mit einem sehr abstrakten Systemmodell begonnen. In weiterer Folge werden hierauf aufbauend entscheidende Komponenten detaillierter weiter entwickelt. Auf diese Weise können auf schnellem Weg gute Modelle entstehen, vorausgesetzt man hat Kenntnis darüber, welche Modellkomponenten einer Verfeinerung unterzogen werden müssen und welche vernachlässigt werden können. Die Gefahr bei Top-Down-Entwürfen besteht darin, Aufwand an einer falschen Stelle zu betreiben (vgl. [27] Seite 126).

Beim Bottom-Up-Entwurf werden ausgehend von kleinen Komponenten größere Strukturen gebildet. Meistens wird dieser Ansatz verwendet, wenn bereits kleinere Modellkomponenten zur Verfügung stehen. Diese können aus den verschiedensten Quellen stammen, beispielsweise aus Bausteinen einer Bausteinbibliothek oder aus Teilmodellen eines Vorgängerprojektes. Die Gefahr bei Bottom-Up-Entwürfen besteht darin, zu viele Details zu integrieren, da bereits auf der Detailebene begonnen wird. Zudem verleitet der bereits vorhandene Vorrat von Teilmodellen oder Bausteinen dazu, nur bereits vorhandene Komponenten zu verwenden und neue Modellierungsideen außer Acht zu lassen (vgl. [27] Seite 126).

Beim Middle-Out-Entwurf wird die Problemlösung mit der am wichtigsten erachteten Komponente begonnen, beispielsweise einem Fertigungsengpass. In weiterer Folge wird um dieses Modellteil die zur Erfüllung der Funktion notwendige Umgebung entwickelt. Wenn schon in einer frühen Phase des Projektes eine Lösungs- oder

Modellierungsidee besteht, wird oft der Middle-Out-Entwurf verwendet. Diese Vorgehensweise ist dabei weniger strukturiert als die klassischen Entwurfparadigmen der Literatur. Trotzdem ist diese sehr pragmatische Methode im Projektalltag oft anzutreffen (vgl. [27] Seite 127).

Bei der Erstellung eines Modells ist die permanente Überprüfung der folgenden Kriterien für ein gutes Ergebnis ausschlaggebend (vgl. [27] Seite 126):

- Richtigkeit: Das reale System muss durch das Modell in Struktur und Verhalten korrekt abgebildet werden.
- Relevanz: Es dürfen nur Teile des Systems modelliert werden, die zur Erfüllung der Aufgabe notwendig sind. Dazu muss ein angemessener Detaillierungsgrad gewählt werden.
- Klarheit: Das Modell soll eine übersichtliche Struktur aufweisen und nachvollziehbar sein.
- Vergleichbarkeit: Modelle, die mit unterschiedlichen Methoden erstellt wurden, müssen zur selben Erkenntnis führen.
- Systematischer Aufbau: Die Modellerstellung erfolgt unter Einbeziehung konsistenter Grundsätze.

### **2.3.2 Modelle zur Energiebedarfsanalyse**

In diesem Kapitel soll anhand von Modellierungsansätzen aus der aktuellen Forschung das Vorgehen beim Aufbau eines Modells dargestellt und beschrieben werden.

Um prognosefähige Energieverbrauchsmodelle für Werkzeugmaschinen entwickeln zu können, müssen zunächst Messungen zur Aufnahme des Energieverbrauchs erfolgen und analysiert werden. Mit den Verbrauchsmessungen verfolgt man zunächst zwei wesentliche Ziele (vgl. [14] Seite 255f):

- Zuordnung der mittleren Leistungsaufnahme zu den jeweiligen Betriebszuständen der Maschine
- Erstellung eines Nutzungsprofils der Maschine

Dabei liegt das Ziel zunächst darin, den einzelnen Maschinenkomponenten einen Verbrauch zuzuordnen. Bei den Verbrauchern innerhalb einer Werkzeugmaschine kann man zwischen Konstantverbrauchern und Verbrauchern mit variabler Leistungsaufnahme unterscheiden, beispielsweise Kühlschmierstoff- und Hydraulikpumpen sowie Antriebs- und Hauptspindeln. Aus den Balkendiagrammen in Abbildung 16 könne die Leistungsaufnahme von verschiedenen Verbrauchergruppen sowie die aktiven Maschinenkomponenten in verschiedenen Zuständen abgelesen werden. Diese Zuordnung der Leistungsaufnahmen der Verbraucher und

Verbrauchergruppen zu bestimmten Betriebszuständen bildet den ersten Schritt zur zustandsbasierten Verbrauchsmodellierung.

In weiterer Folge wird nun die Leistungsaufnahme dahin gehend analysiert, dass exemplarische Nutzungsprofile der einzelnen Maschinen erhoben werden können. Ein exemplarisches Nutzungsprofil einer Werkzeugmaschine ist im rechten Teil der Abbildung 16 ersichtlich. Hierbei ist die Nutzung der Maschine über einen bestimmten Zeitraum dargestellt. Das Nutzungsprofil umfasst dabei z.B. typische Produktions- und Stillstandzeiten und gibt Aufschluss über die typischen Verweildauern in den verschiedenen Maschinenzuständen. Es ist als Basis für die Energieeffizienzsteigerung in jedem Betriebszustand zu sehen (vgl. [14] Seite 255f).

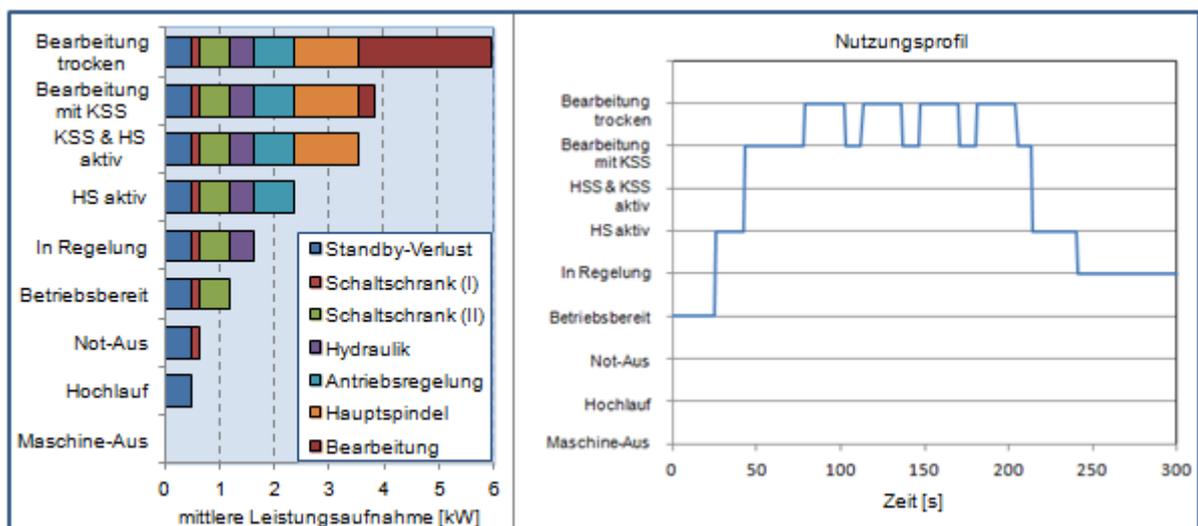


Abbildung 16: Energieverbrauchs- und Nutzungsprofil (vgl. [13] Seite 641)

Das Grundprinzip des zustandsbasierten Ansatzes nach Dietmair und Verl wurde anhand von Kapitel 2.2.1 im Zuge der Darstellung der Betriebszustände einer Werkzeugmaschine erläutert. Im Folgenden soll nun der Vorgang zur Erstellung eines solchen Modelles zusammengefasst werden, um darauf aufbauend die Erweiterung eines solchen Modells zu erklären.

Um die Leistungsaufnahme einer Maschine im Sinne des zustandsbasierten Ansatzes zu modellieren, werden die in Abbildung 16 dargestellten Energieverbrauchs- und Nutzungsprofile wie folgt verwendet. Aus den Leistungsdaten der verschiedenen Komponenten, welche in verschiedenen Zuständen aktiv sind und dem Nutzungsprofil der Maschine, welches Aufschluss über die Maschinenzustände zu verschiedenen Zeitpunkten gibt, wird zunächst ein Einfachmodell erstellt. Hierzu werden dem Nutzungsprofil die Leistungsdaten in den bestimmten Betriebszuständen hinterlegt. Aus Abbildung 17 ist der Lastgang eines solchen Einfachmodells im Vergleich zu einer realen Messung ersichtlich.

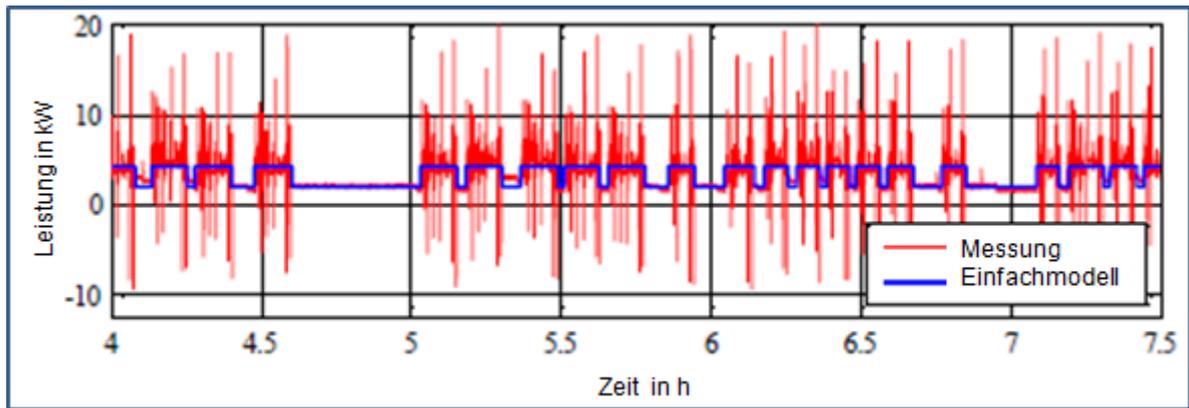


Abbildung 17: Messung und Berechnung des Leistungsaufnahmeprofils (vgl. [29] Seite 645)

Auf diese Weise entsteht ein Modell, welches den zeitlichen Verlauf der Leistungsaufnahme in bestimmten Betriebszuständen schon relativ genau darstellen kann. In anderen Betriebszuständen, beispielsweise während der Fertigung, ist das Ergebnis jedoch noch relativ ungenau. Eine Erhöhung des Detaillierungsgrades kann durch eine in Abbildung 18 schematisch dargestellte Erweiterung des Grundmodells erreicht werden. Dabei kann das Grundmodell im ersten Schritt um parameterabhängige kinematische Modelle erweitert werden, wobei mathematische Beziehungen zwischen bestimmten Maschinenparametern und der Leistungsaufnahme der Maschine eingesetzt werden. Eine zweite Erweiterung würde eine detaillierte Berücksichtigung der Prozesse während einer Bearbeitung mit einbeziehen.

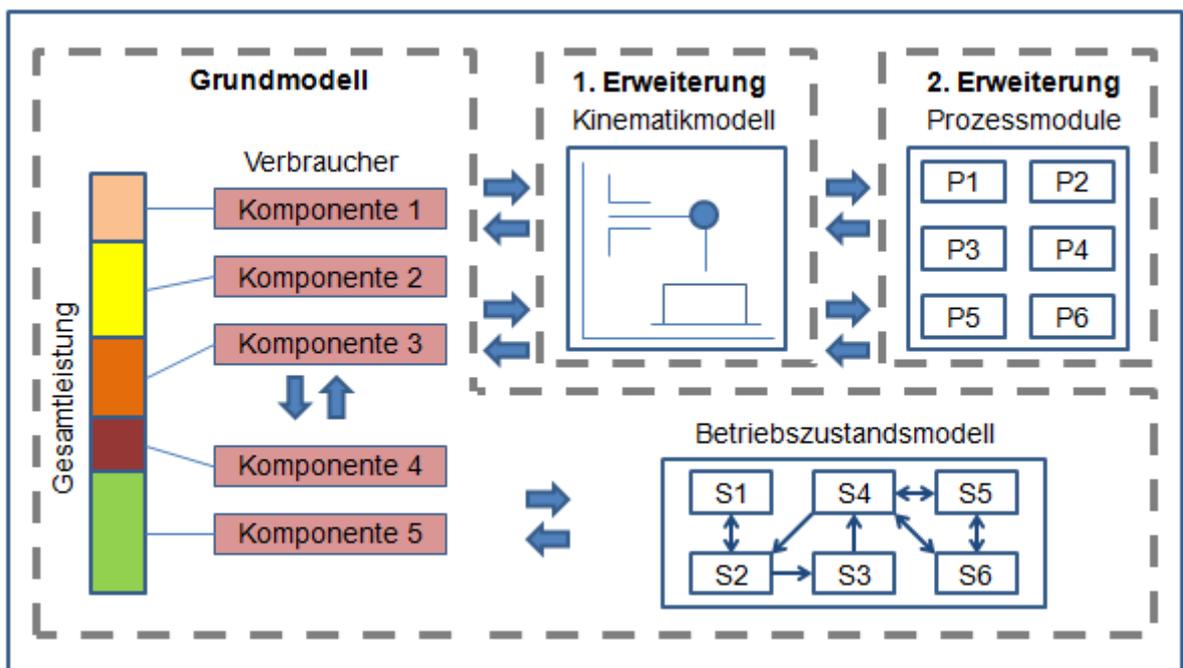


Abbildung 18: Erweiterungen des zustandsbasierten Energieverbrauchsmodells (vgl. [14] Seite 257)

Als Beispiel für eine Erweiterung um ein Kinematikmodell sei auf die Forschung von Heisel und Braun verwiesen [30]. Ihr Modell baut auf dem Zerspanungsgesetz von Kienzle und Victor auf, mit dessen Hilfe Aussagen über Schnittkräfte und damit in weiterer Folge über Leistungsverbräuche getätigt werden können.

Dabei lässt sich die resultierende Schnittkraft  $\{F\}$  in die drei Hauptkomponenten  $F_c$  (in Umfangsrichtung),  $F_f$  (in Vorschubrichtung) und  $F_p$  (in radialer Richtung) aufteilen. Dies wird durch das folgende empirische Gesetz ausgedrückt:

$$\{F\} = \begin{cases} F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_c} \\ F_f = k_{f1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_f} \\ F_p = k_{p1.1} \cdot b \cdot h^{1-m_p} \end{cases} \quad (11)$$

Dabei ist  $\{F\}$  eine Funktion der spezifischen Schnittkraftkoeffizienten  $k_{i1.1}$ , der Schnitttiefe  $a_p$  und der unzerspannten Spandicke  $h$ , die nach Gleichung (10) und (11) vom Einstellwinkel  $\kappa$  abhängen:

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa} \quad (12)$$

$$h = f_z \cdot \sin \kappa \quad (13)$$

Zusätzliche aus der Literatur bekannte Korrekturterme werden hierbei der Einfachheit halber vernachlässigt. Anhand des Schnittparameters  $a_p$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $f_z$  ist es möglich, die grundlegende Spangeometrie aus Gleichung (10) und (11) sowie die Schnittkraft aus Gleichung (9) abzuleiten. Die spezifischen Schnittkraftkoeffizienten  $k_{i1.1}$  und die Exponenten  $m_i$  müssen aus der Literatur übernommen oder im Voraus durch experimentelle Identifikation abgeleitet werden.

Mit Kenntnis über die erwarteten Schnittkräfte während eines Zerspanungsvorgangs können Belastungen für Achsantriebe und Spindel ermittelt werden. Die Zerspanleistung  $P_c$  ergibt sich gemäß:

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (14)$$

## 2.4 Simulation eines Produktionssystems unter energetischen Aspekten

Die Simulation ist die Durchführung von Experimenten an einem Modell. Sie wird zur Leistungsbewertung eines Systems eingesetzt (vgl. [25] Seite 13). Das Ziel der Simulation ist es, neue Erkenntnisse über das System zu gewinnen und daraus Handlungsanweisungen abzuleiten (vgl. [31] Seite 3). Meistens wird durch die Simulation ein Entscheidungsprozess unterstützt, bei dem mehrere Systemvarianten analysiert werden, die sich in Struktur oder Verhalten unterscheiden (vgl. [25] Seite 13). Die Simulation ermöglicht es, existierende Systeme zu optimieren (z.B. Produktionsabläufe, Geschäftsprozesse, Verkehrsflüsse) oder Systeme, die noch nicht in der Realität existieren, im Vorhinein optimal zu planen (z.B. Fabrikplanung) (vgl. [31] Seite 3).

Der Einsatz von Simulation ist ein wichtiges Hilfsmittel bei der Planung, Realisierung und beim Betrieb von komplexen, technischen Systemen. Ein Treiber sind dabei die immer kürzer werdenden Planungszyklen, die auf die folgenden Tendenzen zurückzuführen sind (vgl. [32]):

- steigende Komplexität von Produkten
- steigende Anforderungen an Qualität und Flexibilität
- steigender Kosten- und Konkurrenzdruck
- sinkende Produktlebenszyklen

Die Ursprünge der Anlagensimulation sind in der Gestaltungsphase des Produktionssystems zu finden. Immer häufiger werden Simulationen auch während des Produktionsbetriebs eingesetzt, um kurzfristig und situationsbedingt unterschiedliche Szenarien vergleichen zu können. Dadurch können verschiedene Varianten einfacher beurteilt und die Entscheidungsfindung unterstützt werden. Neben den kurzfristigen Untersuchungen werden Simulationen auch bei der Auffindung langfristiger Entwicklungstrends eingesetzt (vgl. [33] Seite 29). Eine Simulation kann für die unterschiedlichsten Anwendungen verwendet werden, wobei im Folgenden einige wichtige Anwendungsfelder für die Produktion und Logistik aufgelistet sind (vgl. [34] Seite 20):

- proaktive Erkennung von Handlungsbedarf
- Überprüfung von Dispositionsalternativen in der Fertigungssteuerung
- situationsabhängige Maschinenbelegungen, Auftragsreihenfolgen, Losgrößen sowie Personaleinsatz
- Überprüfung von Notfallstrategien und Sofortmaßnahmen
- Ausbildung neuer MitarbeiterInnen
- Variantenuntersuchungen für Prognosezwecke (beispielsweise bezüglich Produktstruktur, Produktmix, Arbeitszeitmodell, Maschinenpark und Arbeitsablauf)

### 2.4.1 Einteilung und Ablauf eines Simulationssystems

Bei der Klassifizierung von Simulationsmodellen bieten sich die folgenden Unterscheidungsmerkmale an (vgl. [25] Seite 13):

- statisch oder dynamisch
- deterministisch oder stochastisch
- kontinuierlich oder diskret

Die Einteilung der Simulationsmodelle ist in Abbildung 19 dargestellt.

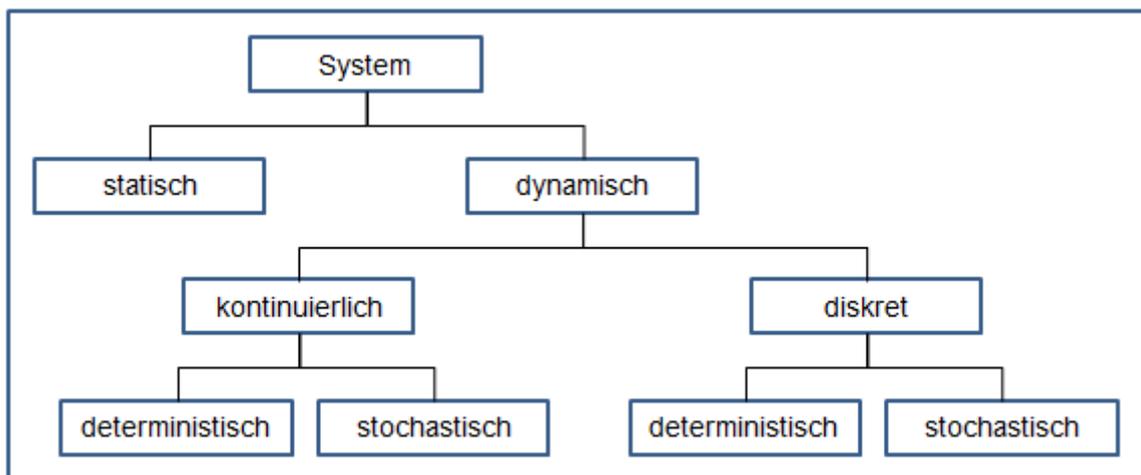


Abbildung 19: Typen von Systemen (vgl. [31] Seite 11)

Dynamische Systeme sind Systeme, in denen Zustandsänderungen stattfinden (vgl. [31] Seite 10). Das Modell repräsentiert dabei das zeitliche Verhalten des Systems (z.B. Simulation einer Fertigungsanlage). Andernfalls sind sie statisch, d.h. das System wird nur zu einem Zeitpunkt betrachtet oder die Zeit spielt keine Rolle (vgl. [25] Seite 13).

Ein dynamisches System, in dem stetige Zustandsänderungen vorkommen, heißt kontinuierlich. Finden die Zustandsänderungen nur in diskreten Zeitpunkten statt, so spricht man von einem diskreten System.

Gibt es mindestens einen Zeitpunkt, für den der Zustand des Systems vom Zufall abhängt und nicht genau vorhergesagt werden kann, so ist das System ein stochastisches System, andernfalls handelt es sich um ein deterministisches System (vgl. [31] Seite 10).

Im Bereich von Produktion und Logistik werden meist Anlagen (z.B. Fabriken, Lager) oder Abläufe (z.B. Prozesse) mit Hilfe von Computermodellen simuliert. Dabei wird das dynamische Verhalten des Systems unter Verwendung stochastischer Komponenten mit Zustandsänderungen an diskreten Zeitpunkten abgebildet. Es werden hauptsächlich Modelle eingesetzt, die ereignisorientiert sind. Das bedeutet, dass das Systemverhalten nachgebildet wird, indem Zustandsänderungen beim Eintritt von Ereignissen beschrieben werden. Man nennt dies auch Discrete Event Simulation (DES). Als typische Ereignisse in Produktions- und Logistiksystemen können beispielsweise die Ankunft eines Auftrags an einer Maschine oder das Ende eines Prozessschrittes gesehen werden (vgl. [25] Seite 13).

Die Kernkomponenten jeder Simulationssoftware, die nach dem DES-Prinzip arbeitet, sind die folgenden ([25] Seite 14):

- Systemzustand: Menge von Variablen, die das System zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben
- Simulationsuhr: Variable mit dem augenblicklichen Wert der simulierten Zeit
- Ereigniskalender (Ereignisliste): Liste mit Zeitpunkten des nächsten Eintritts jedes Ereignistyps (ggf. mit Parametern für diesen Ereignistyp)
- Statistische Zähler: Variablen zur Speicherung von statistischen Informationen über das Systemverhalten
- Initialisierungsroutine: Unterprogramm zur Initialisierung der Variablen zu Beginn der Simulation
- Zeitführungsroutine: Unterprogramm zur Bestimmung des nächsten Ereignisses und zum Vorstellen der Simulationsuhr auf den nächsten Ereigniszeitpunkt
- Ereignisroutine: Unterprogramm zur Änderung des Systemzustands bei Eintritt eines bestimmten Ereignistyps (ein Unterprogramm pro Ereignistyp)
- Bibliotheksroutinen: Unterprogramme zur Erzeugung von Zufallsgrößen, etc.
- Ergebnisroutine: Unterprogramm, welches nach Simulationende aus den statistischen Zählern Schätzwerte für gewünschte Systemleistungsgrößen berechnet und in Form eines Berichts ausgibt
- Hauptprogramm: Unterprogramm, welches durch die Zeitführungsroutine das nächste Ereignis bestimmt und die entsprechende Ereignisroutine aufruft

Der generelle Ablauf einer Simulation kann nach Abbildung 20 schematisch beschrieben werden. Zunächst erfolgt eine Initialisierung der Zustandsvariablen des Modells, der Statistikvariablen, der Simulationsuhr und des Ereigniskalenders. Dann startet ein Zyklus, bei dem die Zeitführungsroutine zuerst das zeitlich nächste Ereignis aus dem Kalender holt, die Simulationsuhr auf den Eintrittszeitpunkt dieses Ereignisses setzt und dann die zugehörige Ereignisprozedur aufruft.

Die Ereignisprozedur ändert die Zustandsvariablen, aktualisiert die Statistikvariablen und fügt gegebenenfalls Folgeereignisse in den Ereigniskalender ein. Nachdem diese Prozedur beendet ist, wird überprüft, ob die Simulation weiterlaufen soll. Nun wird entweder der Zyklus neu gestartet oder die Statistikvariablen ausgewertet und ein Bericht generiert. Der Simulator durchläuft dabei schrittweise alle Ereignispunkte und ändert jeweils den Systemzustand (vgl. [25] Seite 16).

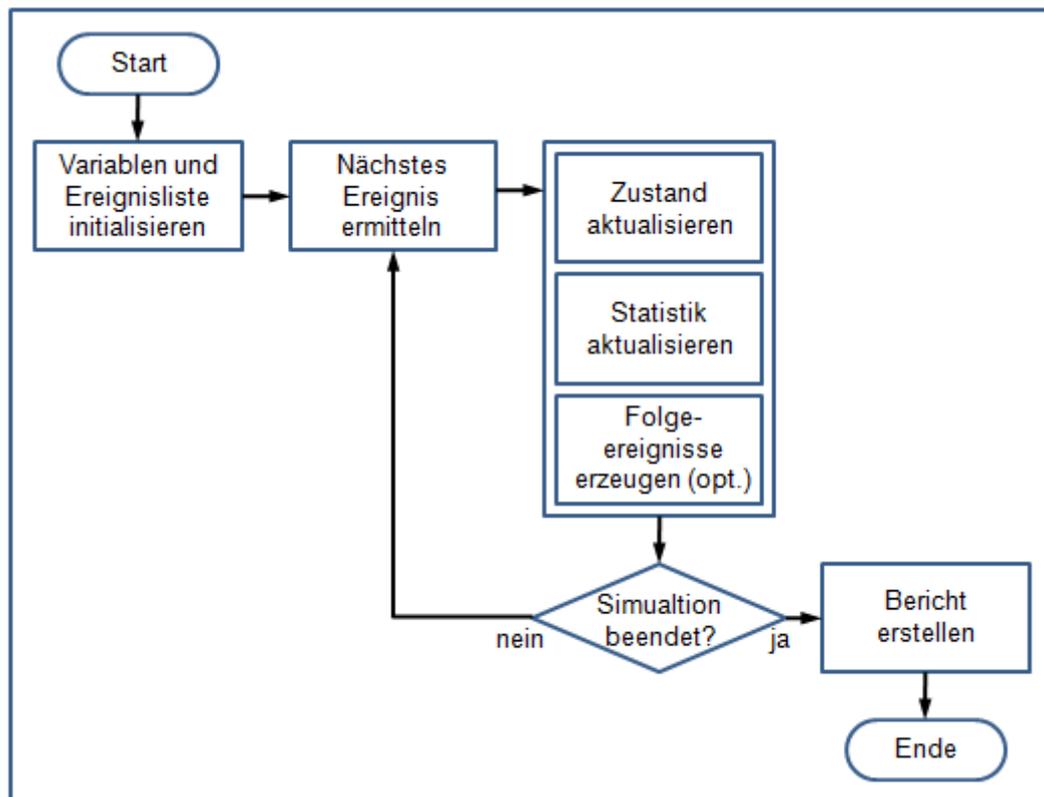


Abbildung 20: Ablaufschema einer ereignisorientierten Simulation (vgl. [25] Seite 16)

## 2.4.2 Einsatz von Simulation in der Produktion

Im Allgemeinen kann für die Simulation innerhalb der Produktion zwischen vier wichtigen Modelltypen unterschieden werden (vgl. [34] Seite 21f):

- Prozess- und Produktsimulation
- maschinennahe Simulation
- maschinennahe Materialflusssimulation
- Fabriksimulation

Die Prozess- und Produktsimulation wird eingesetzt, um beispielsweise bewegliche Bauteile auf Kollisionsfreiheit zu überprüfen, offline programmierte Roboter zu testen oder Maschinenkinematiken zu optimieren. Dabei wird vor allem die Finite Elemente Methode (FEM) eingesetzt, wobei Bauteile in viele kleine, geometrisch abhängige Einzelteile zerlegt werden. Dies wirkt sich mit einer deutlich höheren Rechenzeit im Vergleich zur Ablaufsimulation aus. Als Ergebnis liefern Prozess- und Produktsimulationen insbesondere Prozesszeiten (vgl. [34] Seite 21).

Die maschinennahe Simulation bezeichnet die Simulation von Fertigungsmaschinen und ihrer Peripherie. Dabei werden die maschineninternen Fertigungsprozesse, Maschinensteuerungen und Einflüsse aus der Umgebung betrachtet. Zur Verwendung kommen dabei meist ereignisorientierte, zeitdiskrete Simulationsverfahren, teilweise in Kombination mit Simulationstechnologien der Prozesssimulation (vgl. [34] Seite 21). Einen Spezialfall der maschinennahen Simulation stellt die virtuelle Inbetriebnahme dar. Ihr Ziel ist die Überprüfung einzelner Maschinen oder Anlagen hinsichtlich des Zusammenspiels von Mechanik, Elektrik und Software noch vor der eigentlichen Inbetriebnahme (vgl. [35] Seite 221).

Bei der Liniensimulation liegt der Fokus auf den materialflussbezogenen Abläufen innerhalb komplexer Fertigungsmaschinen und in deren direktem Umfeld. Relevante maschinennahe Materialflussprozesse sind Zu- und Abflüsse von Werkstücken, die Bereitstellung von Werkzeugen und Werkstückträgern sowie die Entsorgung von Rückständen. Das maschinennahe Materialflusssystem kann als eigenständiges System modelliert oder mit den in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten maschinennahen Simulationsarten kombiniert werden. Dies eröffnet die Möglichkeit zur Analyse von Zusammenhängen und Wechselwirkungen zwischen Materialfluss, Maschinensteuerung und Fertigungsprozess.

Die Materialflusssimulation legt den Fokus auf die Modellierung von internen Logistik- und Produktionsabläufen. Sie hat ein breites Anwendungsfeld und wird beispielsweise bei Produktions- und Montageprozessen eingesetzt. Speziell die maschinennahe Materialflusssimulation setzt den Fokus auf materialflussbezogene Abläufe im direkten Umfeld oder innerhalb von Fertigungsmaschinen. Wichtige Abläufe sind dabei beispielsweise Werkstückbewegungen, Abläufe zur Werkzeugbereitstellung und der Abtransport von Rückständen. Werden die maschinennahen Simulationsmodelle, kombiniert können sich Möglichkeiten ergeben Zusammenhänge von Steuerung, Fertigungsprozess und Materialfluss zu analysieren (vgl. [33] Seite 22).

Fabriksimulation ist ein Begriff, der in der Literatur häufig verwendet wird, jedoch keine genaue Definition besitzt. Fabriksimulation steht im engen Zusammenhang mit dem Oberbegriff „Digitale Fabrik“. Die VDI-Richtlinie 4499 gibt für diesen Begriff die folgende Definition: Als Gegenstand des Fachgebiets der Digitalen Fabrik kann der

Aufbau eines umfassenden Netzwerkes von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen (z.B. der Simulation) innerhalb der Systemgrenzen einer Fabrik gesehen werden. Dabei wird bei der Integration auf ein durchgängiges Datenmanagement geachtet. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt (vgl. [36] Seite 11).

### 2.4.3 Energetische Aspekte in der Materialflusssimulation

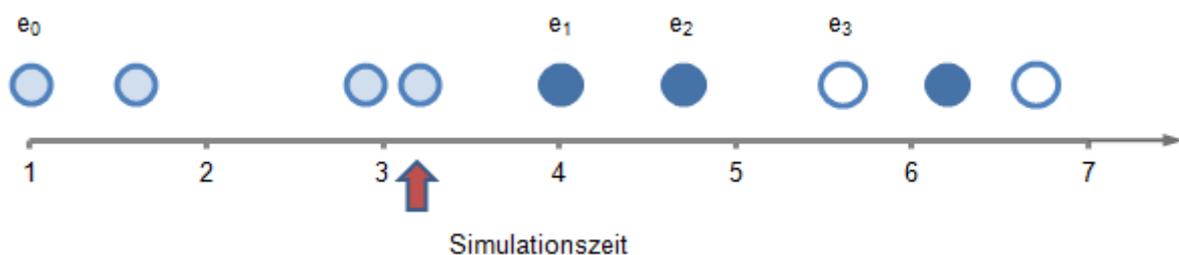
In diesem Kapitel soll erläutert werden, wie die Materialflusssimulation, die üblicherweise auf einer ereignisorientierten diskreten Simulation basiert, um das Attribut der Leistungsaufnahme erweitert werden kann.

Gegenstand der maschinennahen Materialflusssimulation ist die Abbildung logistischer Prozesse in Produktionsstätten. Um diese Prozesse abbilden zu können, muss der Fertigungsfluss modelliert und die Reihenfolge, in der die Maschinen und Anlagen arbeiten, geklärt werden. Die wichtigsten Attribute der Maschinen sind im Wesentlichen folgende:

- die Verweilzeiten der zu fertigenden Produkte in den Maschinen
- Stillstandzeiten durch Störungen oder arbeitsfreie Zeiten
- Rüst-, Werkstückwechsel- und Erholzeiten

Als Ergebnisse erhält man Durchlaufzeiten, Maschinenverfügbarkeiten oder auch Lagerbelegungen, auf deren Basis sich beispielsweise die Anzahl notwendiger Produktionsmittel, die Größe notwendiger Puffer oder auch die Fertigungsreihenfolge besser planen lassen.

Gängige Programme zur Materialflusssimulation basieren alle auf einer ereignisorientierten diskreten Simulation, bei der nach Auftreten eines Ereignisses feststehen muss, welches Ereignis als Nächstes eintreten soll. Hierbei stehen häufig bereits mehrere Folgeereignisse fest. In Abbildung 21 ist der Ablauf beispielhaft dargestellt (vgl. [20] Seite 114).

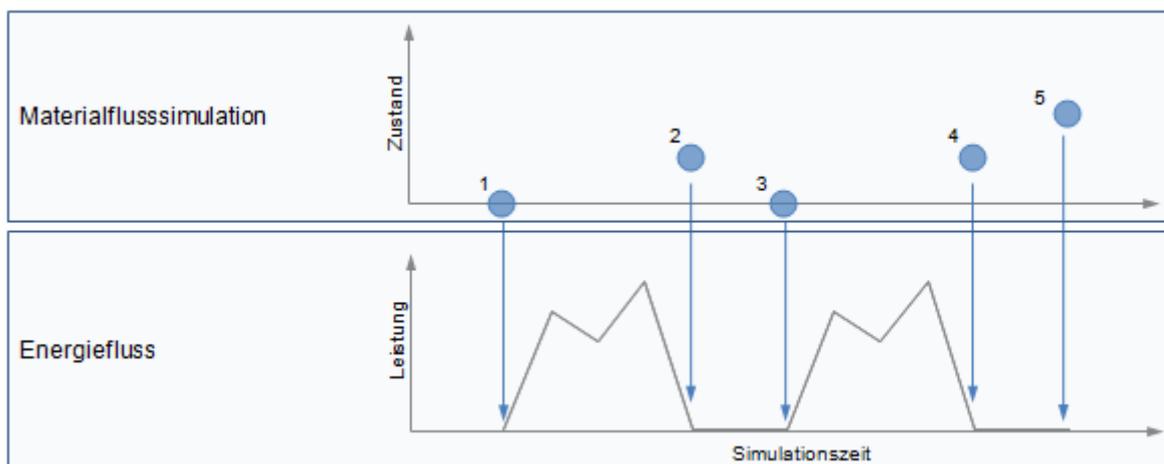


**Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung des Ablaufs einer ereignisorientierten, diskreten Simulation (vgl. [20] Seite 114)**

Wenn man vom aktuellen Zeitpunkt (roter Pfeil) ausgeht, dann haben die grau dargestellten Ereignisse bereits stattgefunden und zur Einplanung der blau

hinterlegten Ereignisse geführt. Beim Eintreten dieser Ereignisse können zusätzliche Ereignisse hinzugefügt werden, welche zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bekannt sind (weiß). Beim Eintreten eines Ereignisses wird die zum Ereignis gehörige Routine aufgerufen, welche zu einer Zustandsänderung und einer möglichen Generierung weiterer Ereignisse führen kann. Die Simulationszeit wird immer auf die Eintrittszeit des nächsten eingeplanten Ereignisses gesetzt. Dadurch werden ereignislose Zeiträume übersprungen. Eingeplante Ereignisse werden üblicherweise in einer Ereignisliste (Ereigniskalender) verwaltet, welche meist nach der Eintrittszeit sortiert ist.

Wenn Energieströme simuliert werden sollen, muss die Materialflusssimulation um zusätzliche Attribute erweitert werden. Beim Auftreten eines Ereignisses, welches zu einer Änderung des Energiestromes führt, beispielsweise das Eintreffen eines Bauteils an einer Maschine wird während der Verweilzeit ein Energiebedarfsmuster wie in Abbildung 22 aktiviert.



**Abbildung 22: Kopplung der Materialflusssimulation mit dem Energiefluss (vgl. [20] Seite 135)**

Dieses Muster stellt die Leistungsaufnahme einer Ressource (z.B. einer Maschine) in einem bestimmten Zeitraum dar. Es kann entweder über ein dynamisches Maschinenmodell berechnet werden oder besteht aus hinterlegten, gemessenen Werten. Die Materialflusssimulation versetzt die Maschinen und Anlagen in der Produktion entsprechend den Produktionsplänen und Maschineneigenschaften in die jeweiligen Zustände. Daraus resultieren Energieströme für jede einzelne Maschine, welche für alle Maschinen zu jedem Zeitpunkt aufaddiert werden und den gesamten, durch die Produktionsmaschinen induzierten Energiebedarf ergeben (vgl. [20] Seite 135).

Dieser Energiebedarf kann beispielsweise zur Verbrauchsbedarfsermittlung verwendet werden oder bildet in einer Planungsphase die Basis für die Auslegung der technischen Gebäudeausrüstung und der Energieversorgung.

## 2.5 Energieeffizienz-Aspekte in der Produktion

Dieses Kapitel fasst die Optimierungsmöglichkeiten am realen Produktionssystem zusammen. Dabei werden sowohl technische als auch organisatorische Maßnahmen zur Energieeffizienz-Steigerung behandelt. Zunächst wird der spezifische Energiebedarf als Möglichkeit zur Bewertung von Optimierungsmaßnahmen vorgestellt.

### 2.5.1 Spezifischer Energiebedarf als Vergleichsgröße

Definitionsgemäß gilt ein System als energieeffizient, wenn es bei einem definierten Output den geringsten Energieeinsatz benötigt. Als Messgröße bietet sich dabei der spezifische Energiebedarf an, welcher sich zum Vergleich von Prozessen, Betriebsmitteln und Produktionssystemen eignet. Der spezifische Energiebedarf lässt sich bei konstanter Stückzahl nur durch die Reduzierung des Energieeinsatzes senken. Die Bestimmungsfaktoren, die zur Ermittlung des spezifischen Energiebedarfs benötigt werden, sind im Einzelfall individuell zu ermitteln (vgl. [19] Seite 122). Hierzu ist in Abbildung 23 als Beispiel die elektrische Energie erläutert.

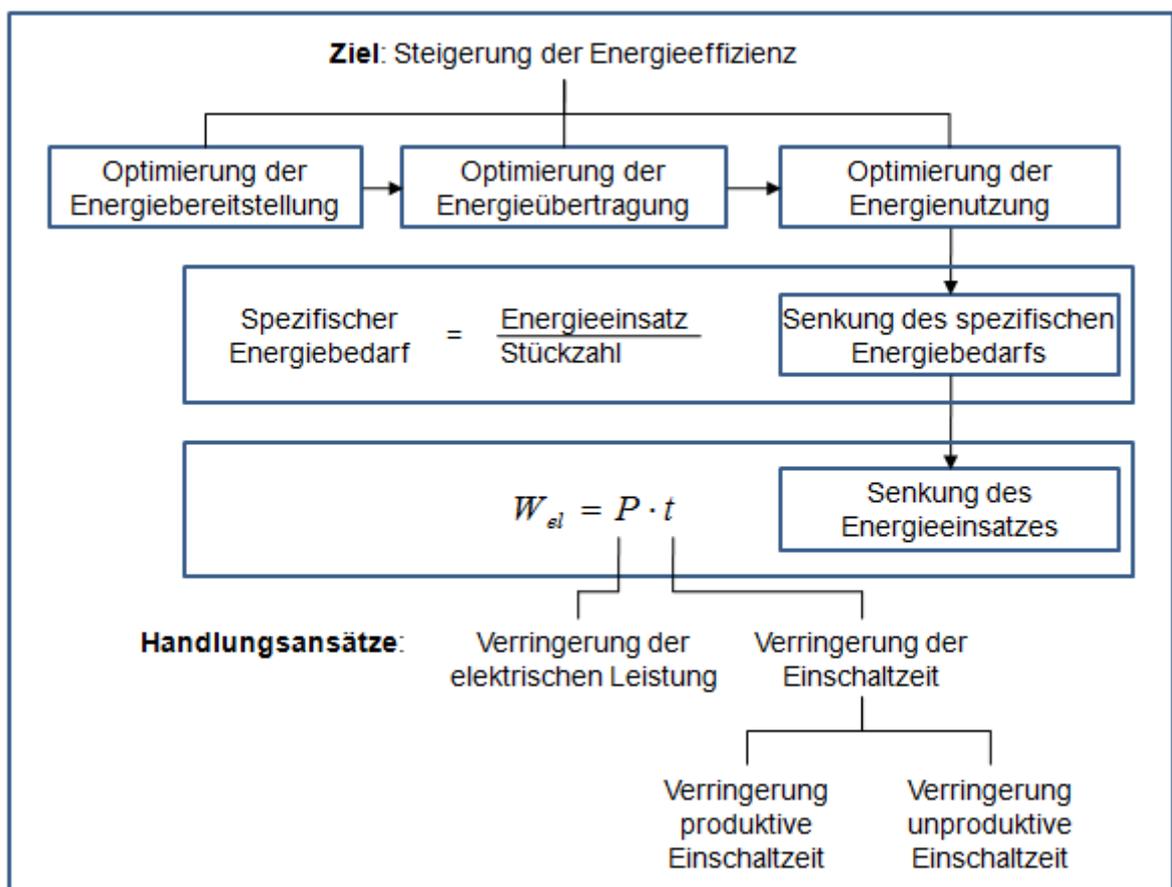


Abbildung 23: Handlungsansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz am Beispiel der Nutzung von elektrischer Energie (vgl. [19] Seite 122)

Prinzipiell ergeben sich zur Steigerung der Energieeffizienz die Möglichkeiten der (vgl. [19] Seite 122):

- Optimierung der Energiebereitstellung
- Optimierung der Energieübertragung
- Optimierung der Energienutzung

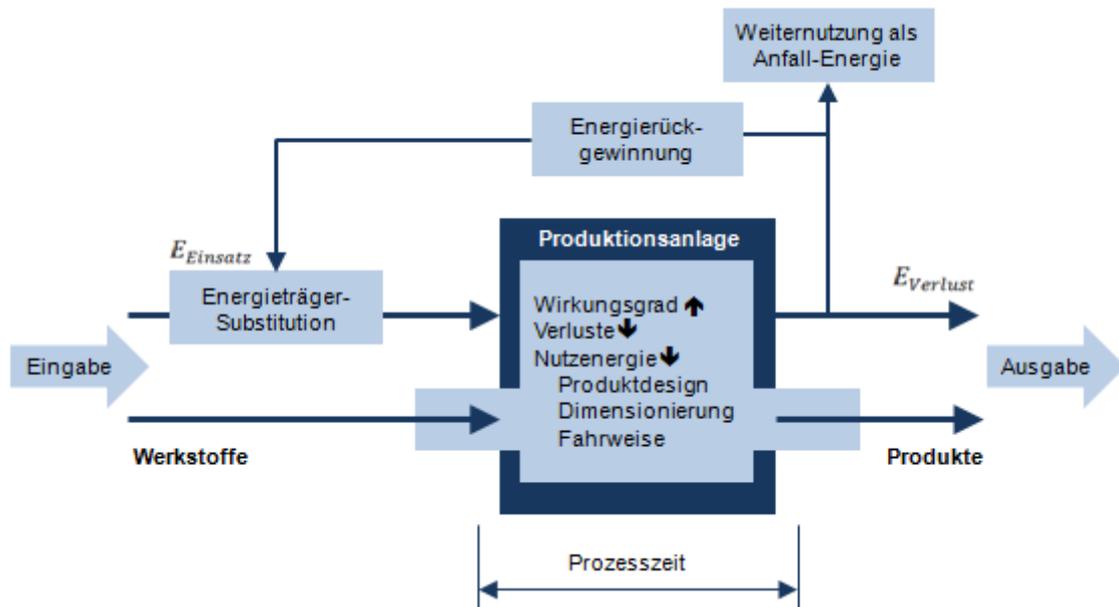
Im anhand von Abbildung 23 dargestellten Beispiel wird auf die Optimierung der Nutzung der elektrischen Energie eingegangen. Die elektrische Energie ergibt sich aus dem Integral der elektrischen Leistung über die Zeit. Als Bestimmungsfaktoren ergeben sich demnach die elektrische Leistungsaufnahme und die Einschaltzeit der elektrischen Verbraucher. Um die Energieeffizienz zu verbessern, muss entweder die elektrische Leistungsaufnahme der Verbraucher, deren Einschaltzeit oder beides verringert werden. Bei der Einschaltzeit kann zwischen produktiven und unproduktiven Zeiten unterschieden werden. Einsparungen können sowohl in unproduktiven als auch produktiven Zeiten gemacht werden. Produktive Zeiten können gesenkt werden, indem Produktionsverfahren oder logistische Abläufe optimiert werden (z.B. Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, kürzere Transportwege, optimierte NC-Programmierung). Unproduktive Zeiten (z.B. Stand-By-Verbräuche) können beispielsweise durch die bedarfsweise Abschaltung der Anlagen infolge einer Verbesserung der Anlagensteuerung verringert werden (vgl. [19] Seite 122). Auch eine Optimierung der Rüstzeiten führt zu einer Verringerung der energierelevanten Einschaltzeit.

## **2.5.2 Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz**

Die Bestimmungsfaktoren der Energieeffizienz sind abhängig vom Prozess, der Anlage und dem eingesetzten Energieträger. Daher ist eine allgemeingültige Identifikation konkreter Bestimmungsfaktoren nur schwer möglich. In weiterer Folge werden daher beispielhaft allgemeingültige Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen vorgestellt. Sie ergeben sich zu (vgl. [19] Seite 123):

- Substitution der eingesetzten Energieträger
- Minderung des Bedarfs an Nutzenergie
- Steigerung des Wirkungsgrades
- Reduktion der Verlustenergie
- Energierückgewinnung
- Weiternutzung von Verlustenergie als Anfall-Energie

Die Zusammenhänge dieser Handlungsansätze zur Energieeffizienzsteigerung in der Produktion sind in Abbildung 24 dargestellt.



**Abbildung 24: Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen (vgl. [19] Seite 123)**

Diese Handlungsansätze dienen dazu, energieeffiziente Planungslösungen zu generieren bzw. Ansätze für die energetische Optimierung zu finden. Sie lassen sich sowohl für Neu- und Erweiterungsplanung als auch für die Überplanung bestehender Anlagen nutzen. Nachfolgend werden die Handlungsansätze im Einzelnen erläutert.

### **Substitution der eingesetzten Energieträger**

Energieträger sind Quellen oder Stoffe, in denen Energie mechanisch, thermisch, chemisch oder physikalisch gespeichert ist. Diese können aus energetischen und aus Kostengründen substituiert werden. Zum Beispiel kann Erdgas als Ersatz für Elektroenergie bei der Warmwasserbereitung oder Prozesswärmeerzeugung genutzt werden (vgl. [19] Seite 124).

### **Minderung des Bedarfs an Nutzenergie**

Die Nutzenergie bezeichnet die Energie in der Form, in der sie vom Endverbraucher genutzt wird (z.B. Licht zur Beleuchtung, Wärme zum Heizen, Antriebsenergie für Maschinen und Fahrzeuge, vgl. [37] Seite 17). Nutzenergie kann durch die folgenden Maßnahmen vermindert werden:

- energetisch optimierte Produktgestaltung
- energetisch optimierte Dimensionierung
- energiesparende Fahrweisen

Ansätze für eine energetisch optimierte Produktgestaltung sind (vgl. [19] Seite 124):

- geringe Werkstückmassen (Einsparung von Schmelzaufwand beim Ur- und Umformen, Einsparung von Energie für den Transport)
- Formgebung, die eine energetisch günstige Fertigung zulässt (z.B. kurze Prozessketten, endformnahe Rohteile, wenig Verschnitt und geringes Spanvolumen)
- Formgebung, die eine einfache, energiesparende Reinigung im Produktionsprozess zulässt
- energetisch günstig gestaltete Fügeverbindungen (z. B. geringe Querschnitte von Schweißverbindungen etc.)
- konstruktive Vorgabe von Stoff- und Oberflächeneigenschaften, welche nur geringfügige Stoffeigenschaftsänderungen und Oberflächenbehandlungen erfordern

Unter energetisch optimierter Dimensionierung versteht man die Vermeidung der Überdimensionierung von Energieerzeugungs-, Energieverteil- und Energienutzungseinrichtungen. Ziel ist es, eine Dimensionierung der Anlagen und Versorgungsinfrastruktur zu schaffen, die dem heutigen und zukünftigen Bedarf entspricht.

Energetisch optimierte Fahrweise (Ansteuern der Produktionsanlage) bezieht sich zum einen auf die Auftragssteuerung zum anderen auf die Anlagensteuerung. Beispiele für eine optimierte Auftragsteuerung wären die Bildung von Auftragsblöcken zur Verminderung von Leerlauf und Stand-By-Zeiten oder ein zeitversetztes Anfahren von Fertigungsanlagen. Eine Optimierung der Anlagensteuerung kann beispielsweise durch eine bedarfsgesteuerte Verwendung von Abluftanlagen erreicht werden, welche über eine Kopplung mit der SPS der Produktionsanlage bedarfsorientiert angesprochen wird (vgl. [19] Seite 124).

### **Steigerung des Wirkungsgrades**

Es existieren mehrere generelle Lösungsansätze, um den Wirkungsgrad, also das Verhältnis zwischen der nutzbar abgegebenen Leistung und der zugeführten Leistung, zu erhöhen.

Generell gilt, dass eine geringere Zahl von Energieumwandlungsstufen energetisch vorteilhaft ist. Dies ist auf die Multiplikation der Einzelwirkungsgrade zu einem Gesamtwirkungsgrad zurückzuführen. Auch die Verkürzung von Prozessketten kann dazu beitragen, den Gesamtwirkungsgrad in der Produktion zu erhöhen. Möglichkeiten dazu wären (vgl. [19] Seite 126):

- die Zusammenführung von mehreren Hauptprozessen zu einem Hauptprozess (z.B. Herstellung von Haupt- und Nebenformen in einem Umformprozess statt mehrerer spanender Prozesse)
- Integration von Hilfsprozessen in Haupt- oder übergeordnete Hilfsprozesse (z.B. prozessintegriertes Prüfen statt sequenzielles Fertigen – Reinigen – Prüfen)

Zudem kann die Auswahl von Anlagen und Anlagenkomponenten (z.B. Elektromotoren), ebenso wie die Auswahl effizienter Verfahren oder Materialien zu einer Erhöhung des Wirkungsgrades beitragen.

Letztlich tragen auch fehlerrobuste, sichere Prozesse maßgeblich zur Erhöhung des Wirkungsgrades bei, da Ausschuss, Fehlchargen und Nacharbeit Energie benötigen ohne dabei einen Nutzen zu generieren.

### **Reduktion von Verlusten**

Die Energieverluste setzen sich aus Umwandlungs-, Transport-, Regel-, Verteil- und Anwendungsverlusten entlang der gesamten Energieumwandlungskette zusammen (vgl. [38] Seite 47). Bei den Energieverlusten von betrieblichen Prozessen kann zwischen den folgenden drei Arten unterschieden werden (vgl. [39] Seite 132):

- direkt stoffgebundene Verluste (z.B. warmes Abwasser, heißes bzw. brennbares Abgas oder warme bzw. heiße Abluft)
- indirekt stoffgebundene Verluste (z.B. Wärmeinhalt von Produkten, Zwischenprodukten oder Abfallprodukten wie beispielsweise Schlacke)
- diffuse Verluste (z.B. Wärmeverluste an der Oberfläche betrieblicher Anlagen, Leckageverluste an wärmeführenden Rohrleitungen oder Reibungswärme).

Die folgenden Handlungsansätze sind als Beispiele zur Reduktion von Verlusten zu sehen (vgl. [19] Seite 127):

- Reduktion von Prozesstemperaturen
- Verbesserung von Wärmeübertragungsprozessen
- Verbesserung der Isolation von wärme- und kälteführenden Leitungen und Anlageteilen
- Reduktion von unproduktiven Einschaltzeiten
- Reduktion von Reibungsverlusten
- Vermeidung von Leckagen durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung.

## **Energierückgewinnung**

Teilweise kann Energie nach der Nutzung im Produktionsprozess für eine erneute energetische Verwendung nutzbar gemacht werden. Dabei ergeben sich Anwendungsmöglichkeiten beispielsweise aus (vgl. [19] Seite 128):

- der Nutzung von Prozessabwärme
- der Rückgewinnung von Bremsenergie aus elektrischen Antrieben zur Netzzurückspeisung

## **Weiternutzung von Anfall-Energie**

Anfall-Energie ist die, durch freie Konvektion, Strahlung und Wärmeleitung an Räume übertragene Abwärme von Personen, elektrischen Betriebsmitteln, prozesswärmetechnischen Anlagen, Warmwasser- und anderen Anlagen. Ihre weitere Nutzung ist eine besondere Form der Energierückgewinnung und kann gegebenenfalls zur gezielten Generierung zusätzlicher Heizungskapazität angewandt werden (vgl. [19] Seite 128).

### **2.5.3 Einfluss der Arbeitsvorbereitung auf den Energieverbrauch**

In der Arbeitsvorbereitung können die zukünftig entstehenden Kosten für ein neues Produkt unter günstigen Voraussetzungen optimiert werden. Ab dem Zeitpunkt der Produktion steigen die Kosten für ein Produkt stark an. Die Einflussmöglichkeiten auf diese Kosten sinken bis zum Zeitpunkt der Produktion dagegen stark ab (vgl. [40] Seite 544). Diese Entwicklung lässt sich auch auf den Energieverbrauch und die damit verbundenen Kosten übertragen. Für eine optimale Berücksichtigung der anfallenden Energieverbräuche in der Produktion ist daher die Kenntnis über verbrauchsbeeinflussende Größen in den Phasen der Planung und der Arbeitsvorbereitung von besonders hoher Relevanz (vgl. [41] Seite 38f).

Eine Gliederung der Arbeitsvorbereitung kann wie folgt vorgenommen werden (vgl. [42] Seite 7):

- Arbeitssystemplanung (Prozessmittelgestaltung)
- Arbeitsablaufplanung (Produktionsmittelgestaltung)

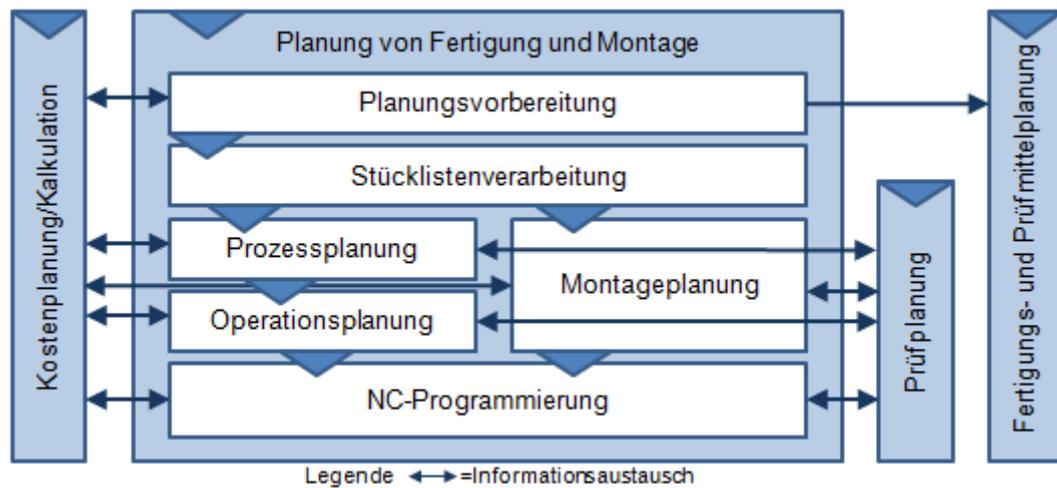
Abele [41] hat die Aufgaben der Arbeitsvorbereitung nach der Beeinflussbarkeit auf den späteren Energieverbrauch bewertet und Ansatzpunkte für Einflussmöglichkeiten erläutert. In Abbildung 25 sind diese Bewertungen und die Einflussmöglichkeiten auf den späteren Energieverbrauch in den Phasen der Arbeitsvorbereitung ersichtlich.

	Aufgaben der Arbeitsvorbereitung	Einflussmöglichkeiten auf späteren Energieverbrauch	Ansatzpunkte
Arbeitsablaufplanung	Planungsvorbereitung	○	nur geringe Möglichkeiten, da nur sehr wenige Informationen verfügbar
	Stücklistenverarbeitung	○	erste Informationen über das Bauteil verfügbar, keine Entscheidungen, die EV beeinflussen
	Prozessplanung	●	hohe Einflussmöglichkeiten bei der Prozessfolgeermittlung bzw. der Auswahl von Fertigungsmitteln
	Operationsplanung	○	geringe Einflussmöglichkeit durch Wahl der Prozessparameter
	Montageplanung	○	kaum Einflussmöglichkeiten
	Prüfplanung	○	kaum Einflussmöglichkeiten
	Fertigungs- und Prüfmittelplanung	●	hoher Einfluss bei der Neuplanung von Fertigungsmitteln und der damit verbundenen Maschinenwahl
	NC- Programmierung	○	geringe Einflussmöglichkeiten durch optimierte Bahnplanung
	Kostenplanung	●	hoher Einfluss durch Entscheidung zur Auswahl alternativer Fertigungsverfahren und Produktionsmittel
Arbeitssystemplanung	Fertigungsmittelplanung	●	hoher Einfluss bei der Auswahl der Bearbeitungsmaschinen
	Lager- und Transportplanung	○	generell geringer Anteil am Gesamtenergieverbrauch der Produktion
	Personalplanung	○	Einflussnahme über Mitarbeiterschulungen zur bewussten Vermeidung von Energieverschwendung
	Flächen- und Gebäudeplanung	○	nur sehr geringe Einflussmöglichkeiten
	Investitionsrechnung	○	kaum Einflussmöglichkeiten
		○ Keine Einflussmöglichkeiten    ○ Geringe Einflussmöglichkeiten    ● ohne Einflussmöglichkeiten	

**Abbildung 25: Einflussmöglichkeiten auf den späteren Energieverbrauch in den Phasen der Arbeitsvorbereitung (vgl. [41] Seite 38f)**

Hieraus geht hervor, dass die Prozessplanung einen hohen Stellenwert bei der energieeffizienten Arbeitsvorbereitung einnimmt. Da diese für die Umsetzung der Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit eine wichtige Rolle spielen wird, soll im Folgenden näher auf die Prozessplanung eingegangen werden.

Die Prozessplanung stellt innerhalb der Arbeitsvorbereitung den ersten Schritt zur Umsetzung einer zeit-, kosten- und energieeffiziente Fertigung der von der Konstruktion festgelegten Gestalts- und Technologieanforderungen des Werkstückes dar (vgl. [43] Seite 150). Die Eingliederung der Prozessplanung im zeitlichen Verlauf der Arbeitsablaufplanung ist in Abbildung 26 dargestellt.



**Abbildung 26: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten innerhalb der Arbeitsablaufplanung (vgl. [44] Seite 24)**

In der Prozessplanung wird festgelegt, welche Bearbeitungsschritte ein Werkstück durchlaufen wird. Zudem wird den einzelnen Arbeitsvorgängen (Prozessen) eine Maschine zugeordnet. Im Detail ergeben sich zur Erstellung des Prozessplans die folgenden Aufgaben (vgl. [44] Seite 24):

- Rohteilbestimmung
- Auswahl der Fertigungsverfahren
- Prozessfolgeermittlung
- Maschinenauswahl
- Auswahl von Vorrichtungen und Werkzeugen
- Vorgabezeitermittlung

Die Abgrenzung zu den Folgeoperationen (Operationsplanung und NC-Programmierung) liegt darin, dass sich diese mit der detaillierten Bearbeitungsplanung auf der jeweiligen Maschine befassen (vgl. [44] Seite 24).

Ein wichtiger Punkt in der Prozessplanung ist die Ermittlung der Vorgabezeiten. Im praktischen Teil dieser Arbeit werden diese Zeiten eine entscheidende Rolle spielen. Aus diesem Grund sind die Begriffsinhalte und die Vorgehensweise zur Ermittlung der Vorgabezeiten für Werkzeugmaschinen in Abbildung 27 zusammengefasst.

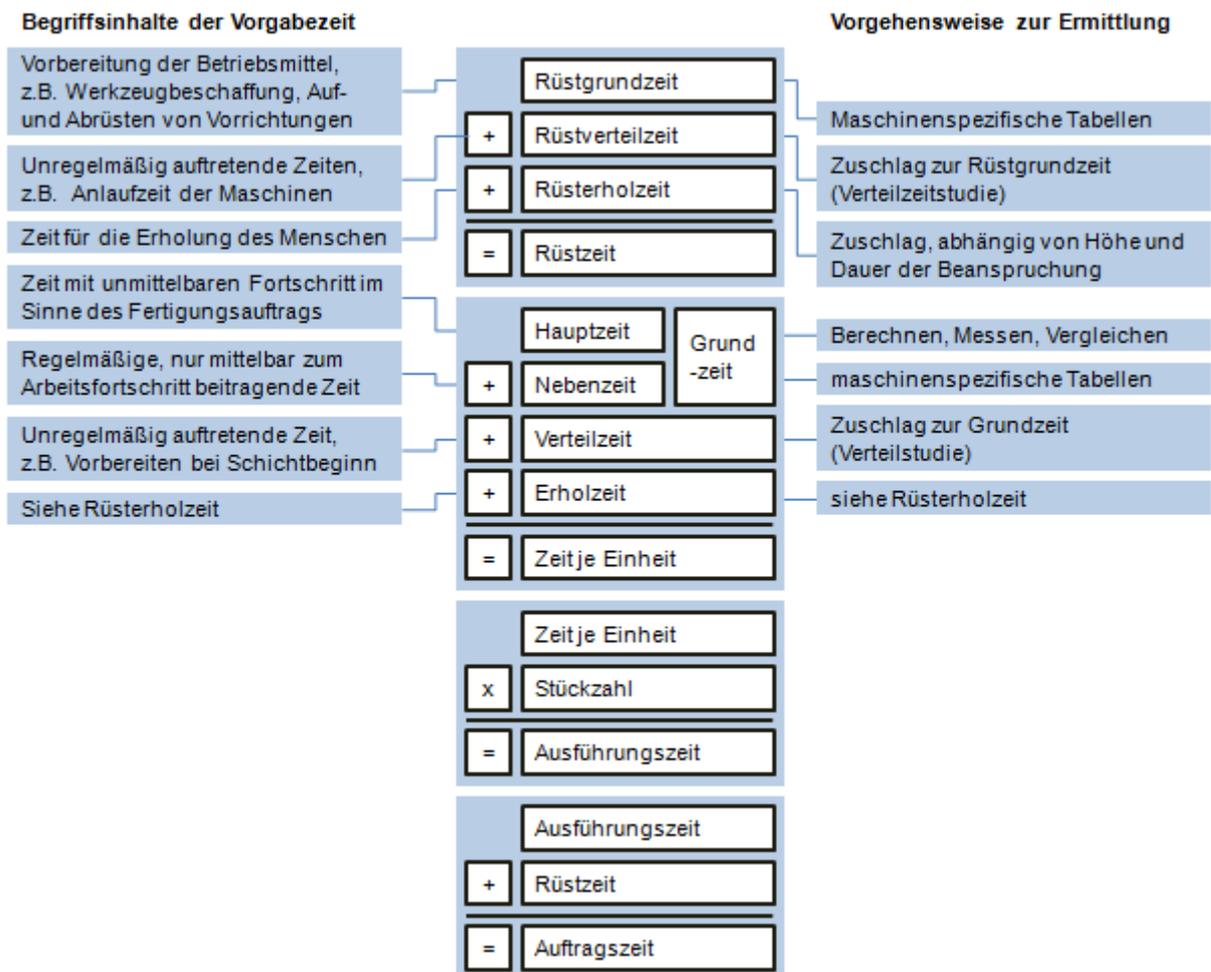


Abbildung 27: Aufbau und Ermittlung von Vorgabezeiten (vgl. [44] Seite 41)

Im praktischen Teil dieser Arbeit werden die mittleren Leistungsaufnahmen für die betrachteten Maschinen während der folgenden Vorgabezeiten messtechnisch erfasst:

- Rüstzeit
- Erholzeit
- Nebenzzeit

Diese Leistungsniveaus werden zusammen mit dem Nutzungsprofil der Maschinen als Datenbasis für die zustandsbasierte Simulation des Energieverbrauchs herangezogen. Zusätzlich werden während der Hauptzeiten die Lastgänge für die jeweiligen Bauteile in einer bestimmten Auflösung aufgenommen und in der Simulation eingesetzt. Die genaue Herangehensweise zur Aufnahme der Daten und zur Durchführung der Simulationsexperimente wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### 3 Zielsetzung und Vorgehen

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Erstellung und Umsetzung eines Konzepts, welches Daten aus einem Energiemonitoringsystem einer Produktionsstätte in ein Simulationsmodell zur Steigerung der Energieeffizienz überführt. Das Modell soll dabei den Energieverbrauch von Werkzeugmaschinen aufbauend auf einem zustandsbasierten Ansatz und des fertigungsbedingten Energieverbrauchs für spezifische Werkstücke abbilden. Dadurch soll es ermöglicht werden, den Energiebedarf für bestimmte Produktionsstätten prognostizieren zu können sowie ein Werkzeug für die Planung und Bewertung von Produktionsszenarien bereitzustellen.

Das erarbeitete Konzept soll in der bestehenden Produktionsstätte mi-factory integriert und auf Basis erhobener Maschinen- und Betriebsdaten auf Plausibilität geprüft werden. Dabei soll bei der Einbindung ein ganzheitlicher Ansatz zur Anwendung kommen, also Methoden zur Datenerfassung, Modellierung, Simulation und Integration ermittelt und eingesetzt werden.

Die Maschinen- und Betriebsdatenerfassung soll mittels der SCADA-Software WinCC OA erfolgen. Hierbei soll einerseits eine Möglichkeit gefunden werden, Betriebszustände aus der Steuerung einer CNC-Werkzeugmaschine auszulesen, andererseits sollen über die Energiedatenerfassung Aussagen bezüglich aktueller Betriebszustände erfolgen. Zur Übermittlung der relevanten energetischen und organisatorischen Betriebsdaten in ein Simulationsprogramm soll in WinCC OA ein Ausgabepanel entwickelt werden, welches die Daten anzeigt und speichert.

Für den Aufbau des Simulationsmodells wird die Materialflusssimulationssoftware Plant Simulation herangezogen, welche die Energieverbräuche der drei Werkzeugmaschinen sowie des Kompressors der mi-factory abbildet. Der Systemaufbau soll so erfolgen, dass eine beliebige Erweiterung des Netzwerkes um zusätzliche Maschinen oder sonstige Verbraucher möglich ist.

Mit Hilfe von Messdaten aus der realen Fertigung soll zunächst das Simulationsmodell validiert und danach anhand von Alternativszenarien der Verwendungszweck als Planungs- und Bewertungswerkzeug ersichtlich gemacht werden. Für die Ermittlung des Einflusses verschiedener leistungstreibender Faktoren soll ein Experiment, bei dem diese Faktoren variiert werden, den Auswirkung auf den Energiebedarf ersichtlich machen. Neben der Rüst-, Bearbeitungs- und Werkzeugwechselzeit soll vor allem der Einfluss der Losgröße analysiert werden.

## 4 Systemaufbau

Im vorliegenden Kapitel wird die Systemumgebung zur Durchführung des praktischen Teils dieser Arbeit beschrieben. Dabei wird speziell auf die folgenden Komponenten eingegangen:

- betrachtete Werkzeugmaschinen
- verwendete Messtechnik
- verwendete Simulations- und Prozessvisualisierungs-Software

Der praktische Teil dieser Arbeit wurde in der Demonstrations- und Innovationsfabrik des researchTUb in der Aspern Seestadt (mi-factory) umgesetzt. In der mi-factory kommen neue fertigungstechnische Ansätze zum Einsatz, welche auch anhand von Demonstrationsprodukten erprobt werden. Diese Produkte wurden für die Simulation herangezogen. In Abbildung 28 sind das Labor des Aspern IQ sowie die Maschinen der mi-factory dargestellt.



Abbildung 28: Abbildung des Seestadt IQ-Gebäudes [45] und die Maschinen der mi-factory

Die Maschinendatenerfassung erfolgt an drei CNC-Werkzeugmaschinen der Hersteller Emco, Hermle und Haas. Die Maschinen verfügen über fest installierte Messtechnik zur elektrischen Leistungs- und Druckluftmessung. Zudem steht ein Rechner mit der SCADA-Software WinCC OA für die Datenerfassung und -aufbereitung zur Verfügung. In Abbildung 29 ist ein Übersichtsplan der mi-factory mit der Positionierung der Maschinen und des Schaltschranks dargestellt.

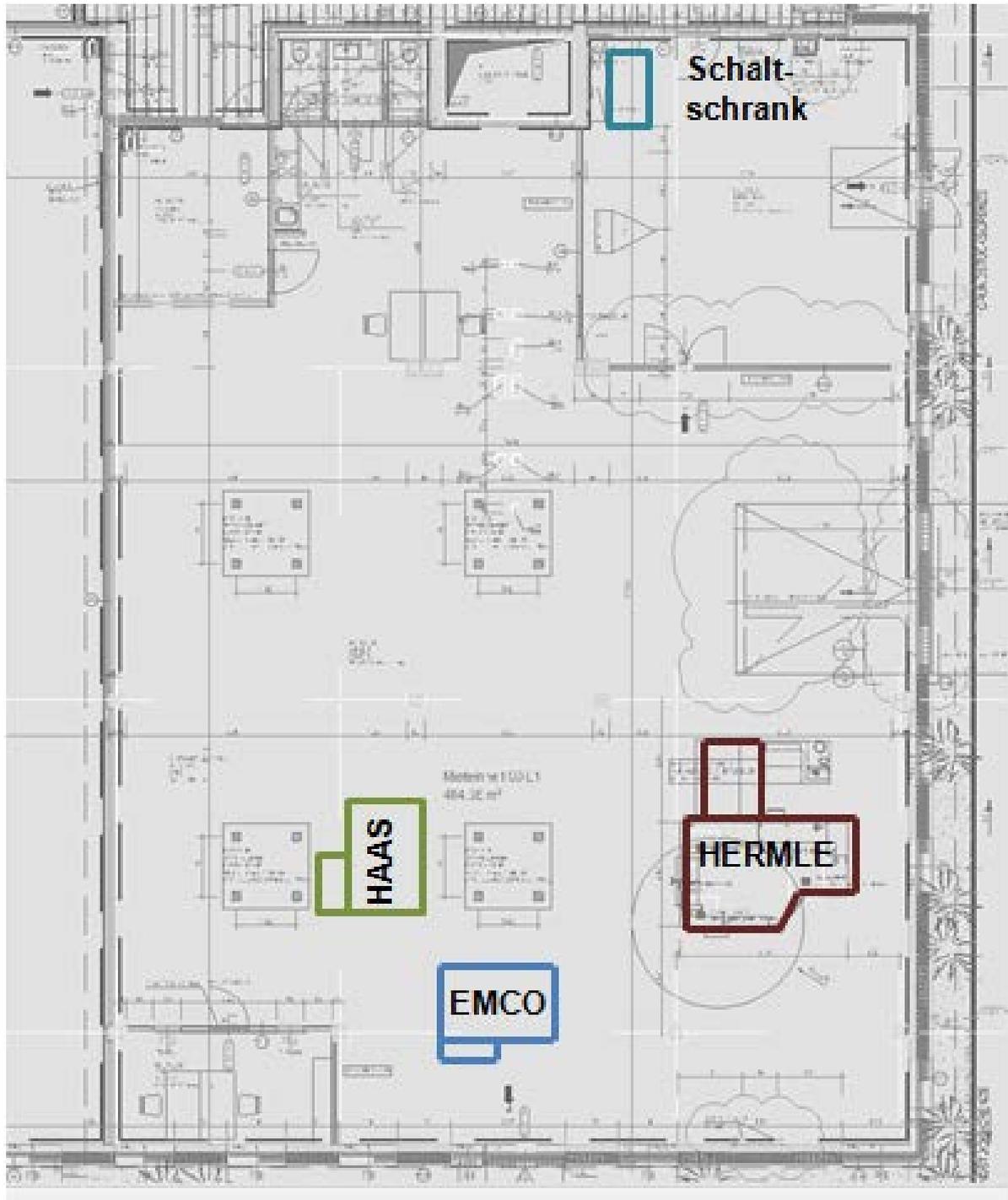


Abbildung 29: Übersichtsplan und Maschinenaufstellung der mi-factory

## 4.1 Werkzeugmaschinen

### 4.1.1 EMCO Maxxturn 45



Abbildung 30: Drehzentrum EMCO Maxxturn 45 (vgl. [46] Seite 1)

Die EMCO Maxxturn 45 ist ein Drehzentrum, welches für die Fertigung von Futter- und Stangenteilen geeignet ist. Sie ist mit einer SIEMENS SINUMERIK 840D sl Steuerung ausgestattet und verfügt über eine Gegenspindel sowie einen WZ-Revolver mit angetriebenem Werkzeug. Die wichtigsten Eckdaten dieser CNC-Werkzeugmaschine sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Technische Kerndaten EMCO Maxxturn 45 (vgl. [46] Seite 10)

EMCO Maxxturn 45	
max. Stangendurchlass	45 mm
max. Drehzahl Hauptspindel	6300 U/min
max. Drehzahl Gegenspindel	6300 U/min
max. Drehzahl angetriebene Werkzeuge	6000 U/min
max. Antriebsleistung:	
Hauptspindel	13 kW
Gegenspindel	10 kW
max. Verfahrweg X/Y/Z	160/70/510 mm
Eilgangsgeschwindigkeit X/Y/Z	24/10/30 m/min
Anzahl Werkzeugaufnahmen	12 x VDI 25
Anzahl der angetriebenen WZ-Positionen	12
Steuerung	SINUMERIK 840D sl
Maschinengewicht	4000 kg
Baujahr	2012
Maschinen Absicherung	50 A
Kühlmittelversorgung	intern

### 4.1.2 HERMLE C42U



**Abbildung 31: 5-achsiges Bearbeitungszentrum HERMLE C42U [47]**

Die HERMLE C42U ist ein Bearbeitungszentrum, welches für die Fünfachsbearbeitung ausgelegt ist. Es verfügt über einen NC-Dreh-Schwenktisch, der mit Bauteilen von bis zu 400 kg beladen werden kann. Die Maschine ist mit einer HEIDENHEIN iTNC530 Steuerung ausgestattet. Die technischen Kerndaten der Maschine sind aus Tabelle 3 ersichtlich.

**Tabelle 3: Technische Kerndaten HERMLE C42U (vgl. [48] Seite 9)**

<b>HERMLE C42U</b>	
Arbeitsbereich (Verfahrweg X/Y/Z):	800 x 800 x 550 mm
Antriebsleistung:	29 kW
max Drehzahl:	25000 1/min
Anzahl Achsen	5
Eilgang X/Y/Z - B(A)/C:	60/60/60 m/min - 55/65 1/min
Werkzeugmagazin:	42 Werkzeuge
CNC Steuerung:	Heidenhain iTNC530
Maschinengewicht:	14.000 kg
Werkstückgewicht:	max. 450 kg
Baujahr:	2012
Maschinen Absicherung:	50 A
Kühlmittelversorgung	externes Aggregat

### 4.1.3 HAAS VF-2

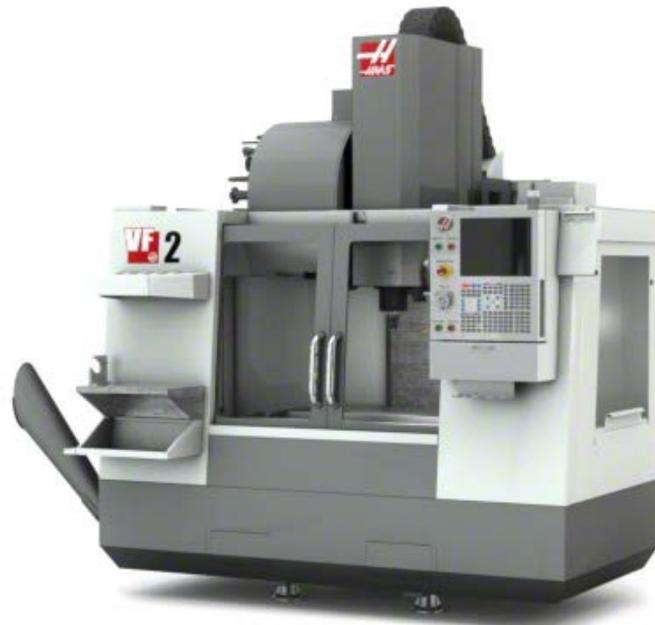


Abbildung 32: Vertikales Bearbeitungszentrum HAAS VF2 [49]

Die HAAS VF-2 ist ein vertikales Bearbeitungszentrum zur dreiachsigen Bearbeitung und mit einem 22,4 kW Vektorantrieb. Die Maschine ist mit einer FANUC Steuerung ausgestattet. Die Eckdaten der Anlage sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Technische Kerndaten HAAS VF2 (vgl. [50])

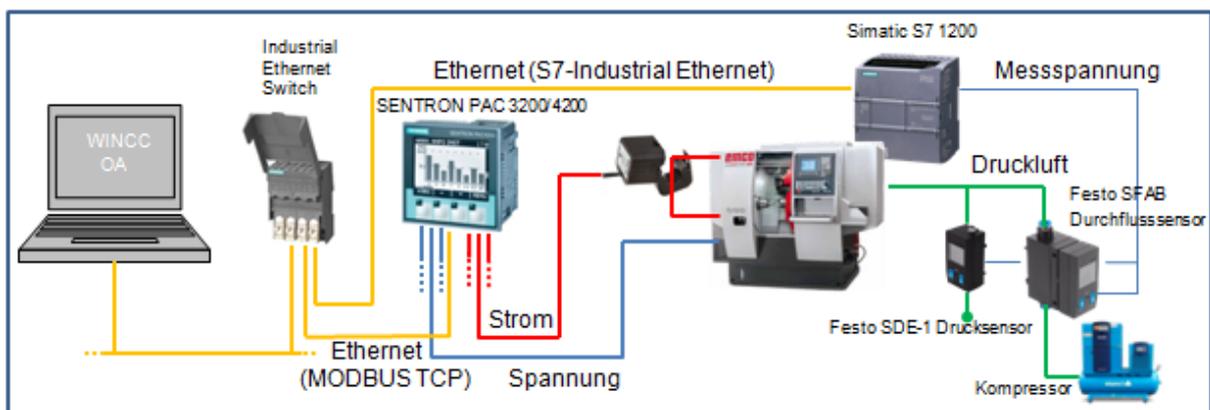
HAAS VF2	
Arbeitsbereich (Verfahrweg X/Y/Z):	762 x 406 x 508 mm
Antriebsleistung:	15 kW
Drehzahl max.:	7500 1/min
Anzahl Achsen	3
Eilgang X/Y/Z - B(A)/C:	25,4/25,4/25,4 m/min
Werkzeugmagazin:	24 Werkzeuge
CNC Steuerung:	Fanuc
Maschinengewicht:	3629 kg
Werkstückgewicht:	max. 1361 kg
Baujahr:	2011
Maschinen Absicherung:	20 A
Kühlmittelversorgung	externes Aggregat

## 4.2 Messtechnik

In diesem Kapitel wird die verwendete Messtechnik zur Erfassung der erforderlichen Maschinendaten genauer beschrieben. Dabei kann wie folgt klassifiziert werden:

- Erfassung von elektrischen Energiedaten (Strom, Spannung, Leistung)
- Erfassung von Druckluftdaten (Luftdruck, Durchfluss)

Der Aufbau des Messsystems ist am Beispiel für einen Messpunkt an einer Maschine schematisch in Abbildung 33 dargestellt und soll im Folgenden näher erläutert werden.



**Abbildung 33: Schematischer Aufbau der Messtechnik**

Die elektrische Leistung wird über fest installierte Multifunktionsmessgeräte (SENTRON PAC) gemessen. Die erforderlichen Spannungs- und Stromwerte werden dem Dreiphasennetz an den gewünschten Messpunkten entnommen. In Abbildung 33 ist die Strommessung rot und die Spannungsmessung blau eingezeichnet. Die Spannung kann dabei direkt über Klemmen abgenommen werden. Für die Strommessung müssen Stromwandler (z.B. ELEQ TQ30) herangezogen werden.

Die Druckluftmessung (in der Abbildung grün hervorgehoben) erfolgt über einen Drucksensor und einen Durchflusssensor. Der Drucksensor misst dabei den aktuellen Differenzdruck zwischen dem System und der Umgebung. Die Daten werden in Form von Spannungssignalen (0 bis 10 V) an die Maschinensteuerung übergeben und dort weiterverarbeitet.

Die Daten aus der Maschinensteuerung und aus den Multifunktionsmessgeräten werden über einen Industrial Ethernet Switch an den Rechner übergeben und mit der SCADA-Software WinCC OA aufbereitet.

## 4.2.1 Elektrische Messungen

Die elektrischen Leistungsmessungen erfolgen über SENTRON Power Analysis and Control (PAC) 3200 und 4200 Multifunktionsmessgeräte. Mit diesen Geräten ist es möglich, verschiedene elektrische Messgrößen über ein integriertes Display anzuzeigen. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit, die gesammelten Daten über eine Schnittstelle zu einem PC zu transferieren und aufzunehmen (vgl. [51]).



Abbildung 34: SENTRON PAC 3200 (links) und 4200 (rechts) [51]

Im Folgenden werden einige grundlegende Spezifikationen beider Messgerätetypen angegeben. Diese entstammen dem Siemens-Datenblatt [51].

Beide Messgeräte können zur Spannungsmessung an Industrienetzen von bis zu 690 V bei einem Direktanschluss verwendet werden. Zusätzlich ist eine Messung über Spannungswandler möglich.

Für die Strommessung ist der Anschluss an einem Stromwandler in einem Wandlerverhältnis von  $x: 1$  Ampere oder  $x: 5$  Ampere vorgesehen.

Das Gehäuse ist im eingebauten Zustand für den Einsatz in rauer Umgebung ausgelegt und nach der Schutzart IP 65 staub- und strahlwassergeschützt konstruiert.

Folgende Messgrößen können mit SENTRON PAC 3200 und PAC 4200 ermittelt werden:

- Spannung (Phase-Phase, Neutraleiter-Phase und Dreiphasen-Durchschnitt)
- Strom (pro Phase und Dreiphasen-Durchschnitt)
- Scheinleistung (pro Phase und gesamt)
- Wirkleistung (pro Phase und gesamt)
- Leistungsfaktor (pro Phase und gesamt)
- Frequenz der Bezugsphase
- Mittel-, Minimal- und Maximalwerte der oben genannten Messgrößen

Die Geräte verfügen über eine Energiezählerfunktionalität, mit welcher Schein-, Wirk- und Blindenergien aufgezeichnet werden können. Beim integrierten Tarifzähler kann zwischen Hoch- und Niedertarif gewechselt werden. Weiters verfügt das Gerät über minutengenau einstellbare Messperioden sowie einen Betriebsstundenzähler.

Die Geräte verfügen zudem über Überwachungsfunktionen und digitale Ein- und Ausgänge. Damit ist die Umsetzung einer Grenzwertüberwachung und die Programmierung von Verknüpfungen über eine Boolesche Logik möglich.

Die wichtigsten Unterschiede der beiden Typen 3200 und 4200 sind folgende:

- Anzahl der messbaren Größen
- Messgenauigkeit
- Erfassung von Messdaten zur Beurteilung der Netzqualität
- Ausmaß der Speicherfunktionen
- Erweiterte Bildschirmanzeige

Mit dem PAC 3200 lassen sich 50 Basiswerte messen. Im Gegensatz dazu lassen sich mit dem PAC 4200 bis zu 200 Messgrößen messen. Weiters können mit dem PAC 4200 auch Ströme und Spannungen mit unterschiedlichen Frequenzen gemessen werden. Diese können dabei von der 3. bis zur 31. Oberschwingung erfasst werden. Die Messgenauigkeit des PAC 3200 liegt für Ströme bei 0,2%, für Spannungen bei 0,3% und für Leistungen sowie für Energie bei 0,5% der Maximalwerte. Die Messgenauigkeit für Ströme, Spannungen sowie Leistungen betragen beim PAC 4200 weniger als 0,2% und sind dadurch deutlich genauer. Neben den zusätzlichen Messgrößen und dem größeren Messbereich können mit dem PAC 4200 auch Aussagen über die Netzqualität getroffen werden. Dazu werden Phasenwinkel, Asymmetrien für Spannung und Strom mit Bezug auf die Amplitude und den Phasenwinkel sowie die Verzerrungsstromstärke ermittelt. Weiters wird die Total Harmonic Distortion (THD) für Drehleiter sowie Vierleiternetze erfasst. Durch diese Werte können Rückschlüsse auf die Netzurückwirkungen getroffen sowie Gegenmaßnahmen identifiziert werden.

Beide Gerätetypen verfügen über eine Grenzwertüberwachung. Mit dem PAC 3200 können bis zu sechs Messgrößen auf obere und untere Grenzwerte überwacht werden, mit dem PAC 4200 bis zu zwölf. Mittels Boolescher Logikfunktionen können diese Werte auch miteinander verknüpft werden und beispielsweise Schaltfunktionen an den digitalen Ausgängen übernehmen.

Im Gegensatz zum PAC 3200 besitzt PAC 4200 eine umfangreiche Speicherfunktion. Beispielsweise können Schein-, Wirk- und Blindleistungen alle 15 Minuten gemittelt und über 40 Tage aufgenommen werden. Dadurch entsteht ein detaillierter Überblick über den Energiebedarf einer Anlage. Mit diesen Daten können beispielsweise

Auslastungsoptimierungen getroffen werden, um gegebenenfalls günstigere Strompreise zu nutzen. Durch einen, jedem Messwert anhaftenden Echtzeitstempel kann sekundengenau nachvollzogen werden, wann welches Ereignis aufgetreten ist. Dies vereinfacht vor allem die Analyse von unerwartet aufgetretenen Fehlern.

#### 4.2.2 Druckluftmessung

Die Durchfluss- und Druckmessung erfolgt mit FESTO-Messgeräten. Zur Druckmessung werden Druckschalter aus der SDE1-Serie eingesetzt. Die Messung des Durchflusses wird mittels Messgeräten des Fabrikats SFAB durchgeführt. Die in weiterer Folge angegebenen Informationen über diese Gerätschaften stammen aus den FESTO-Datenblättern [52] und [53].



**Abbildung 35: Druckschalter Festo SDE1 (links) [53] und Durchflussmessgerät Festo SFAB (rechts) [52]**

Der Durchflusssensor SFAB ist für einen Betriebsdruck von bis zu 10 bar ausgelegt. Je nach Baugröße des Sensors liegt der Messbereich des Durchflusses von gefilterter Luft zwischen 0 und 10 l/min, 0,5 und 50 l/min, 20 und 200 l/min, 6 und 600 l/min, 10 und 1000 l/min. Das Messgerät verfügt über einen programmierbaren Hysterese- bzw. Komparatormodus für die Durchführung von Steuerungs- und Regelungsaufgaben. Die Messsensoren werden üblicherweise zur Leckageerkennung, Dichtigkeitsprüfung und Durchflussregelung eingesetzt.

Die SDE1-Druckmessschalter von Festo verfügen je nach Sensortyp über Messbereiche von 0 und -1 bar, -1 und 1 bar, 0 und 2 bar, 0 und 6 bar, 0 und 10 bar). Mit einer Genauigkeit von 2% kann ein Differenz- oder Relativdruck gemessen werden. Dabei basiert die Druckmessung auf einem piezoresistiven Messverfahren.

### 4.3 Datenerfassung und -verarbeitung

Dieses Kapitel befasst sich mit der SCADA-Software WinCC OA, welches zur Erhebung, Auswertung und Weiterverarbeitung der Maschinenbetriebsdaten verwendet wurde.

Unter SCADA (engl: Supervisory Control and Data Acquisition) versteht man einerseits das Überwachen und Melden von Prozesszuständen, andererseits das Steuern und Regeln von technischen Prozessen mittels eines Computer-Systems (vgl. [54] Seite 725). Derartige Systeme werden meist auch als Leitsysteme oder Visualisierungssysteme bezeichnet.

Bei WinCC OA (Windows Control Center Open Architecture) handelt es sich um ein Software-Paket für die automatisierungstechnische Anwendung, dessen Haupteinsatzgebiet die Bedienung und Überwachung technischer Anlagen mittels vollgrafischer Bildschirm-Arbeitsplätze darstellt.

Diese Anwendung erfordert neben der visuellen Darstellung der aktuellen Prozesszustände auch die Möglichkeit, Vorgaben und Befehle an den Prozess und dessen Steuerungseinrichtungen zu übermitteln. Der Bediener verwendet hierzu Maus, Tastatur und andere, rechnerartige Eingabegeräte. Die Alarmierung bei kritischen Zuständen oder Grenzwertüberschreitungen sowie die historische Aufzeichnung von Daten zur späteren Darstellung und Auswertung gehören ebenfalls zu den Kernfunktionen der Software (vgl. [55]).

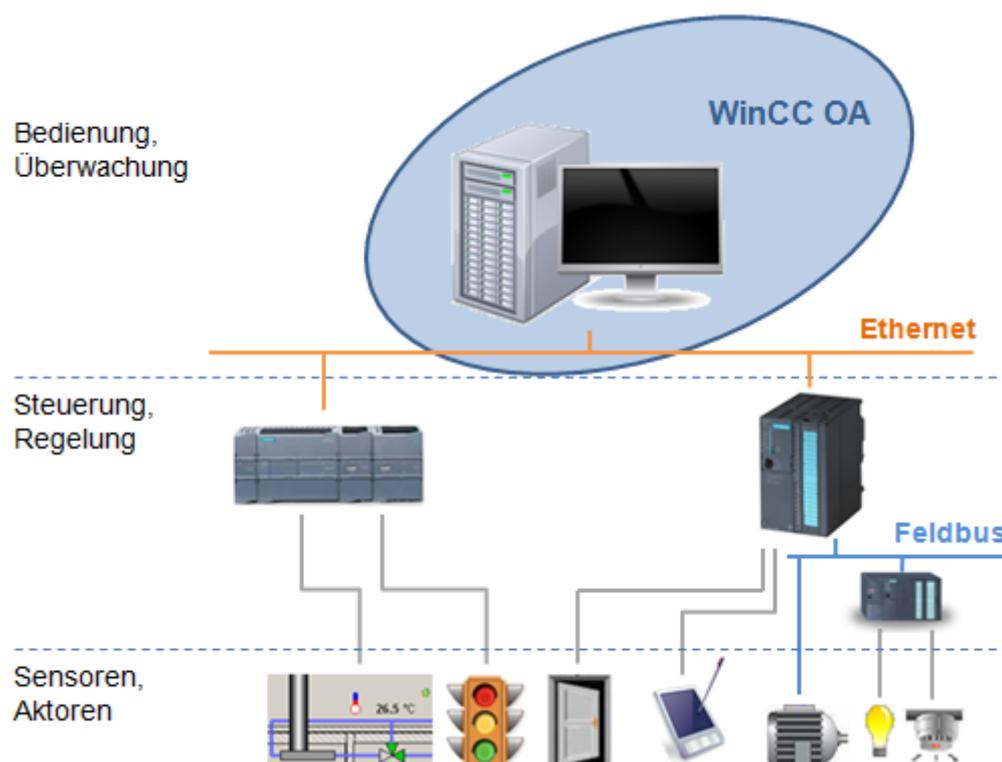


Abbildung 36: Rolle von WinCC OA innerhalb eines Automatisierungssystems (vgl. [55])

Bei WinCC OA handelt es sich also um die übergeordnete Software für die Leitwarte oder Maschinenbedienung. In Abbildung 36 ist die Rolle von WinCC OA innerhalb eines Automatisierungssystems dargestellt. Server und Arbeitsstationen auf PC-Basis dienen als Hardwareplattform. Zusammen mit den Steuerungs- und Regelungseinrichtungen der Basisautomatisierung (SPS) und deren Sensorik bzw. I/O-Modulen bildet es ein komplettes Automatisierungssystem (vgl. [55]).

WinCC OA ist ein modular aufgebautes System, was bedeutet, dass die Aufgaben der Software in autonome Ausführungseinheiten unterteilt werden. Diese Einheiten werden auch Manager genannt. Das Managersystem von WinCC OA ist in Abbildung 37 dargestellt.

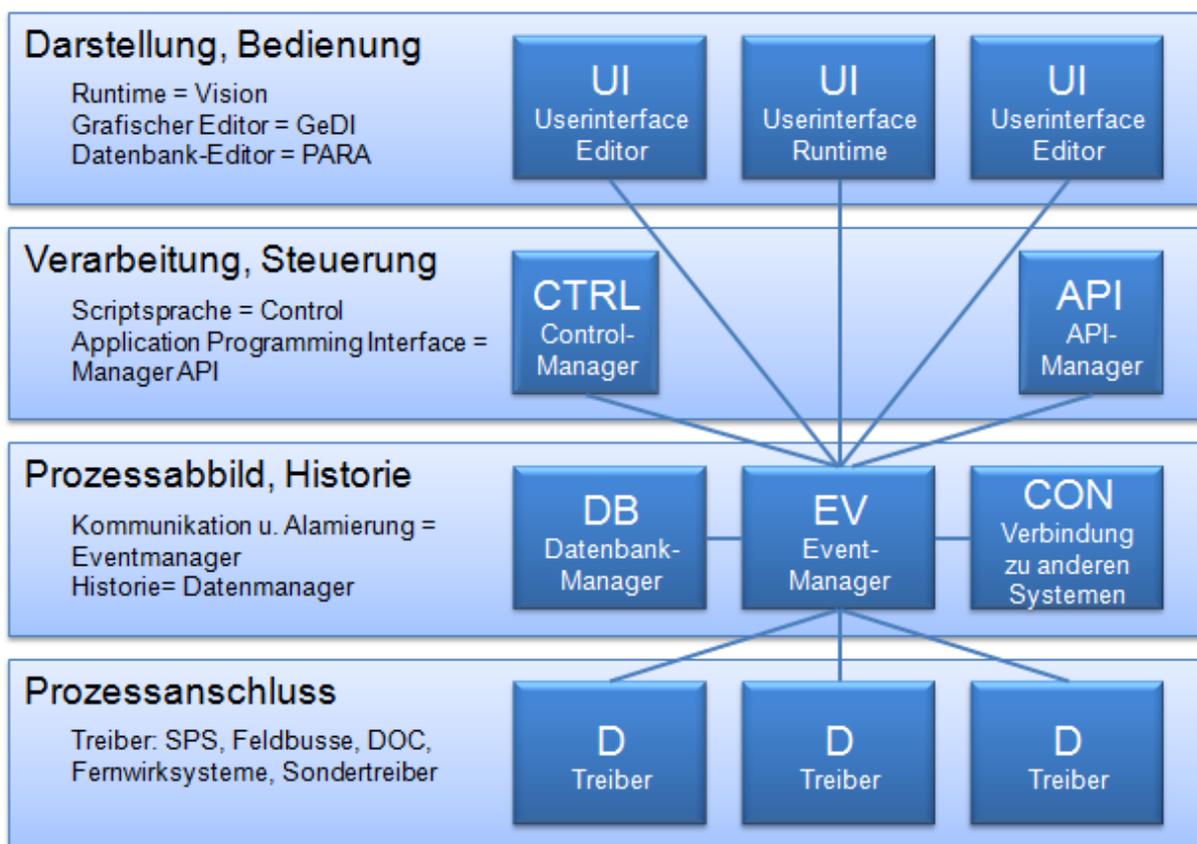


Abbildung 37: Manager eines WinCC OA Systems (vgl. [55])

Die unterste Ebene in einem WinCC OA-System bilden die Prozessanschlüsse, in WinCC OA auch Treiber (D) genannt. Hier arbeiten unterschiedliche Softwareprotokolle, um die Daten aus der Hardware in WinCC OA überzuführen. Da es unterschiedliche Kommunikationsformen zu SPS oder Fernwirkknoten gibt, können mehrere verschiedene Treiber ausgewählt werden. Der Treiber-Manager erstellt für jeden Mess- und Schaltpunkt einen Datenpunkt und sorgt weiters für die Weiterleitung der Daten an den Event-Manager.

Der Event-Manager (EV) ist das zentrale Verarbeitungszentrum in WinCC OA. Hier wird ein stets aktuelles Abbild aller Prozessvariablen generiert. Jede andere

Funktionseinheit (Manager) kommuniziert mit dem Event-Manager, um auf Daten zugreifen zu können. Diese werden dabei aus dem Prozessabbild des Event Managers entnommen, wodurch nicht direkt mit der Steuerung kommuniziert werden muss. Umgekehrt wird ein Befehl von einem Bedienplatz zunächst nur als Wertänderung im Prozessabbild des Event Managers gesetzt. Die Weiterleitung an das entsprechende Zielgerät erledigt dann der zuständige Treiber. Neben der Aufgabe eines Kommunikationszentrums führt der Event-Manager auch die Alarmbehandlung durch und ist außerdem in der Lage, verschiedene Rechenfunktionen auszuführen.

Der Datenbank-Manager (DB) stellt das Bindeglied zur Datenbank dar. In solch einer Datenbank werden zum einen die Parametrierdaten einer Applikation gespeichert, zum anderen Wertänderungen oder Alarme permanent aufgezeichnet. Die Abfrage historischer Daten durch einen Benutzer wird ebenfalls vom Datenbank-Manager erledigt und nicht über die Datenbank selbst.

Auf der Verarbeitungs- und Steuerungsebene gibt es mehrere Möglichkeiten, Algorithmen und Verarbeitungen zu implementieren. Die beiden Wichtigsten sind die interne Sprache „Control (CTRL)“ und die allgemeine Programmierschnittstelle „Application Programming Interface (API)“.

Control ist eine sehr leistungsfähige Scripting-Sprache. Die Verarbeitung erfolgt interpretativ. Das bedeutet, dass kein Übersetzungsvorgang vom Quellcode in den vom Prozessor verarbeitbaren Maschinencode (Compilation) notwendig ist. Die zur Programmierung erforderliche Syntax entspricht weitestgehend ANSI-C (international genormte und weit verbreitete, höhere Programmiersprache). Die Sprache bietet eine umfassende Funktionsbibliothek für Aufgaben der Leit- und Visualisierungstechnik. Control kann als eigenständiger Prozess (CONTROL-Manager), zur Animation und Oberflächengestaltung (UI-Manager) oder für standardisierte, datenobjektbezogene Verarbeitungen (Event-Manager) verwendet werden (vgl. [55]).

Das Application Programming Interface (API) stellt die mächtigste Form von Funktionserweiterungen dar und ist aufgrund seiner hohen Komplexität für den normalen Benutzer von geringerer Bedeutung. Es ist als C++-Klassenbibliothek ausgeführt und erlaubt Softwareentwicklern, individuelle Funktionen als eigenständigen zusätzlichen Manager zu realisieren. Alle WinCC OA-Standardmanager basieren auf API. Anwendung findet dieser Manager hauptsächlich bei der Weiterentwicklung von WinCC OA oder bei der Umsetzung kundenspezifischer Sonderwünsche, die durch den vorhandenen Softwareumfang nicht abgedeckt werden können. Außerdem können eigene Treiber für die Kommunikation mit bisher nicht unterstützter Hardware erstellt werden (vgl. [33] Seite 60f).

Der User-Interface-Manager (UI) bildet die Schnittstelle zum Benutzer. Hierbei handelt es sich um einen grafischen Editor (GEDI), einen Datenbankeditor (PARA) oder die allgemeine Bedienoberfläche der Applikation (Modul Vision). Im User-Interface können Werte angezeigt, Befehle gegeben oder Alarme in der Alarmliste verfolgt werden. Auch die Darstellung von historischen Daten in Diagrammen oder die Ausgabe von Reporten sind üblicherweise Bestandteil des UI. In WinCC OA ist die Benutzerinteraktion programmtechnisch von der Hintergrundverarbeitung getrennt, man hat lediglich eine Sicht auf die Daten des aktuellen Prozessabbildes oder der Historie (vgl. [55]).

## 4.4 Simulationssoftware

In diesem Kapitel wird die verwendete Simulations-Software Tecnomatix-Plant Simulation beschrieben. Tecnomatix ist der Überbegriff für das Product-Life-Management (PLM) Softwarepaket der Firma Siemens. Neben Plant Simulation zählen folgende Teilbereiche und zugehörige Softwarelösungen zum weiteren PLM-Produktportfolio (vgl. [33] Seite 62f):

- Part Manufacturing (z.B. NX CAM, Teamcenter Manufacturing)
- Assembly Planning (z.B. Process Designer, Robcad)
- Plant Design and Optimization (z.B. Plant Simulation, Factory CAD)
- Human Performance (z.B. NX Jack, Process Simulate Human)
- Product Quality (z.B. CMM Inspection Programming, Variation Analysis CAD)
- Production Management (z.B. Xfactory, FactoryLink)
- High Tech and Electronics (z.B. Assembly Expert, UniCam)

Plant Simulation ist ein diskretes Ereignissimulationswerkzeug, mit dem digitale Modelle logistischer Systeme (z.B. für die Produktion) erstellt und die Eigenschaften eines Systems untersucht werden können. Die digitalen Modelle ermöglichen die Durchführung von Experimenten und Was-Wäre-Wenn-Szenarien mit dem Ziel, Optimierungspotenziale aufdecken und bessere Entscheidungen in der Frühphase der Produktionsplanung treffen zu können. Analysewerkzeuge zur Erkennung von Engpässen und zur Erstellung von Statistiken und Diagrammen ermöglichen die Auswertung unterschiedlicher Fertigungsszenarien. Die Verwendung der Software soll den Benutzer dabei unterstützen (vgl. [56]),

- Produktionssysteme in Bezug auf Layout, Steuerungslogik und Ressourcendimensionierung auszulegen,
- Korrekturmaßnahmen im Produktionsablauf zu vermeiden, indem Probleme schon in frühen Phasen der Planung erkannt werden,
- die Anlaufzeit der Produktion zu verkürzen,

- Investitionskosten für Produktionslinien zu minimieren, ohne die Ausbringungsmenge zu gefährden und
- die Leistung vorhandener Systeme zu optimieren, indem Maßnahmen umgesetzt werden, die vor dem Einsatz in einer Simulationsumgebung verifiziert worden sind.

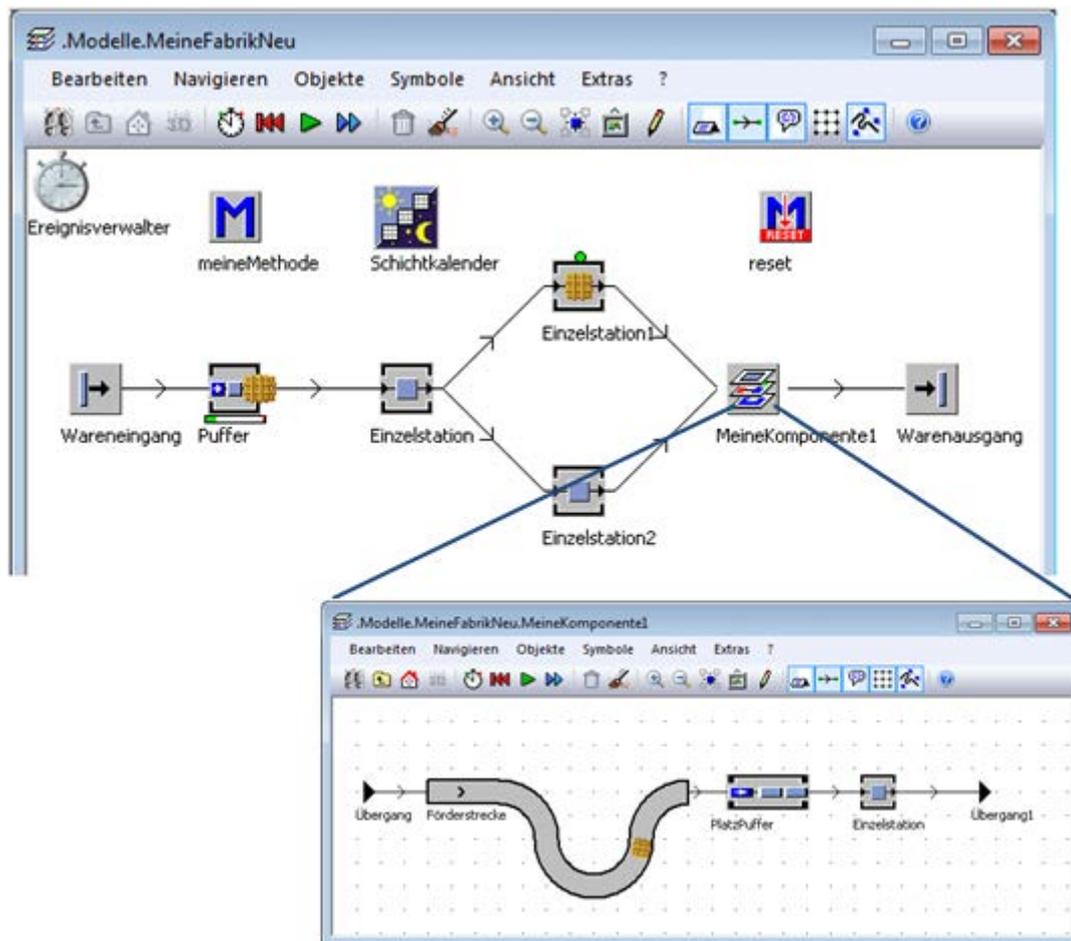
Plant Simulation wird überwiegend in der Produktions- und Logistikplanung eingesetzt. Die Anwendung eignet sich für viele Wirtschaftszweige, beispielweise für die Automobilindustrie und ihre Zulieferer, Anlagenbauer, Bahnbetreiber und Krankenhäuser. Dabei wird es neben der strategischen Planung von neuen Systemen und der Optimierung von vorhandenen Anlagen (Offline-Anwendungen) auch zur Unterstützung des operativen Tagesbetriebes (Online-Anwendungen) benutzt. Es wird eingesetzt, um den Durchsatz zu optimieren, Engpässe zu beseitigen und Bestände zu minimieren.

Simulationsmodelle berücksichtigen interne und externe Lieferketten, Produktionsressourcen sowie Geschäftsprozesse, um die Auswirkungen unterschiedlicher Produktionsvarianten zu analysieren. Zudem werden unterschiedliche Steuerstrategien der Produktionslinien bewertet und die Synchronisierung von Haupt- und Nebenlinien überprüft.

Die wichtigsten Funktionen der Software sind:

- objektorientierte Modelle mit Vererbungshierarchie
- offene Architektur mit Unterstützung verschiedenster Schnittstellen
- Bibliotheks- und Objektmanagement
- Optimierung durch genetische Algorithmen
- automatische Analyse von Simulationsergebnissen
- HTML-basierte Berichterstellung
- 2D- und 3D-Visualisierung
- Energieverbrauchssimulation und -analyse

Mit Plant Simulation können auf einfache Weise hierarchisch gegliederte Modelle erstellt werden. Das Konzept einer hierarchischen Strukturierung hat dabei den Vorteil, dass Komponenten, die in einem Netzwerk modelliert werden, in anderen Netzwerken eingesetzt werden können. Auf diese Weise können einzelne Komponenten eines Simulationsmodells außerhalb des Netzwerks modelliert und getestet werden, um anschließend im Gesamtmodell Verwendung zu finden. In Abbildung 38 ist die hierarchische Modellierungsweise anhand eines Beispiels ersichtlich. Durch diese Modellierungsmöglichkeiten wird nicht nur die Erstellung komplexer Systeme und Steuerstrategien vereinfacht, sondern auch die Erstellung und Wiederverwendung eigener Module ermöglicht (vgl. [57]).



**Abbildung 38: Beispiel für eine Modellierung in Plant Simulation**

Plant Simulation verfügt über eine offene Systemarchitektur, die Schnittstellen und Integrationsmöglichkeiten, beispielsweise aus Systemen wie CAD, HTML, Oracle SQL und XML, unterstützt. Dadurch können Daten aus anderen Programmen in Plant Simulation importiert, in eine Liste oder Tabelle geschrieben und an die Materialflussobjekte übergeben werden. Importierte Daten können zudem den Materialflussobjekten auch direkt zur Verfügung gestellt werden, indem beispielsweise eine Datei-Schnittstelle verwendet wird.

Klassenbibliotheken zeigen eingebaute Objekte hierarchisch strukturiert in Ordnern und Unterordnern an. Standardmäßig enthält eine Klassenbibliothek Ordner für Materialflussobjekte, Ressourcenobjekte, bewegliche Objekte, Informationsflussobjekte, Modelle und Tools. Neben den Standardobjekten zur Abbildung von Abläufen und Materialflüssen können eigene Simulationsbausteine entwickelt und in einer eigenen Bibliothek gespeichert werden.

Die Verwendung von genetischen Algorithmen stellt ein Optimierungswerkzeug zur Verfügung, um Lösungen für komplexe Reihenfolge-, Zuordnungs- oder Auswahlprobleme zu ermitteln. Aus einer Startmenge von Lösungsvorschlägen werden die erfolgreichsten ausgewählt und daraus neue Lösungsvorschläge

generiert. In einem zyklischen Prozess werden immer neue, bessere Generationen von Lösungsvorschlägen erstellt.

Im Experimentverwalter können Experimente definiert werden, um ein System automatisch analysieren zu können. Basierend auf benutzerdefinierten Parametern führt Plant Simulation die unterschiedlichen Simulationsläufe aus, stellt die Ergebnisse dieser Experimente zur Verfügung und weist die wesentlichen Einflussfaktoren aus.

Die Ergebnisse eines Simulationslaufes oder eines Experiments können in einem Bericht automatisch abgefasst werden. Dabei werden die erhobenen Daten in Tabellen geschrieben und mit Hilfe von Diagrammen visualisiert. Das hierdurch entstehende Dokument wird auf einer Reihe von HTML-Seiten auf dem Bildschirm angezeigt und kann gedruckt, gespeichert oder auf einer Webseite angezeigt werden.

Zusätzlich zur effizienten 2D-Ansicht kann die Simulation in einer 3D-Umgebung visualisiert werden. Mit den Plant Simulation-Bibliotheken oder mit eigenen 3D-CAD-Daten können 3D-Modelle aufgebaut und für unterschiedliche Zwecke verwendet werden.

Ab der elften Version von Plant Simulation werden Werkzeuge zur Berücksichtigung des Energieverbrauches bei der Modellierung, Analyse und Optimierung der Produktion zur Verfügung gestellt. Den einzelnen Ressourcen (z.B. Maschinenmodellen) können Leistungsaufnahmen in verschiedenen Betriebszuständen hinterlegt werden, welche in weiterer Folge mit einem Energieanalyser-Baustein ausgewertet werden können. Anwendung findet diese Erweiterung beispielsweise bei Analysen zu Stand-By-Schaltungen von Maschinen und Energieeinsparmöglichkeiten in der Produktion.

## 5 Praktische Umsetzung

### 5.1 Energiemessung und Monitoring

In Kapitel 4.2 wurde der Aufbau der Messkette für einen Messpunkt erläutert. Anhand des vorliegenden Kapitels soll gezeigt werden, welche relevanten Messpunkte im Zuge dieser Arbeit in der Aspern IQ mi-factory abgenommen wurden. Wie eingangs erwähnt, kann die Leistungsmessung einer Maschine an verschiedenen Punkten erfolgen, womit genauere Aussagen über das energetische Verhalten der Maschine und deren Komponenten getätigt werden können. Abbildung 39 zeigt eine Systemskizze der gemessenen Verbraucher und der abgenommenen Messpunkte.

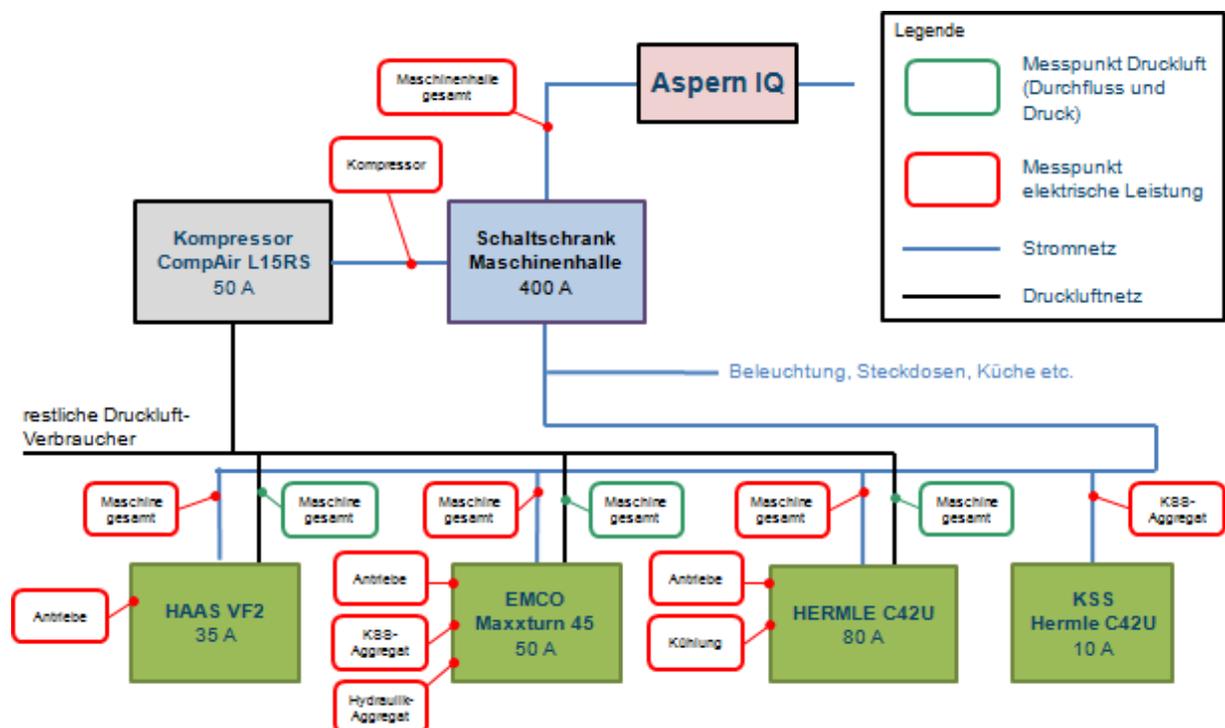


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Messpunkte in der mi-factory

In der Aspern IQ mi-factory werden elektrische Leistungen und Druckluftverbräuche gemessen. Die Gesamtleistung der Maschinenhalle wird vor dem Schaltschrank abgenommen. Dabei werden sämtliche Verbraucher gemessen. Hierunter fallen die Maschinen, der Kompressor, die Beleuchtung und andere Verbraucher (z.B. Küche und Computer), die für die Durchführung der Experimente von geringer Bedeutung sind. Ein weiterer Messpunkt befindet sich vor dem Kompressor, welcher die drei Maschinen mit Druckluft versorgt. Hier wird die aufgenommene elektrische Leistung des Kompressors gemessen. Die Druckluftverbräuche und aktuellen Drücke werden mittels Durchfluss- und Druckmessung an jeder Maschine einzeln erfasst. Jede der drei Maschinen verfügt über einen Messpunkt zur Erfassung der Gesamtleistung.

Zusätzlich werden relevante Messpunkte innerhalb der Maschine gemessen. Diese sind, wie im Folgenden dargestellt, für jede Maschine unterschiedlich:

- HAAS VF-2: Antriebe
- EMCO Maxxturn 45: Antriebe, Hydraulikaggregat, Kühlschmierstoffaggregat
- HERMLE C42U: Antriebe, Kühlung, externes Kühlschmierstoffaggregat

In WinCC OA werden die Daten gespeichert und über verschiedene Panels in WinCC OA-Vision visuell ausgegeben. Das Hauptpanel ist in Abbildung 40 ersichtlich.

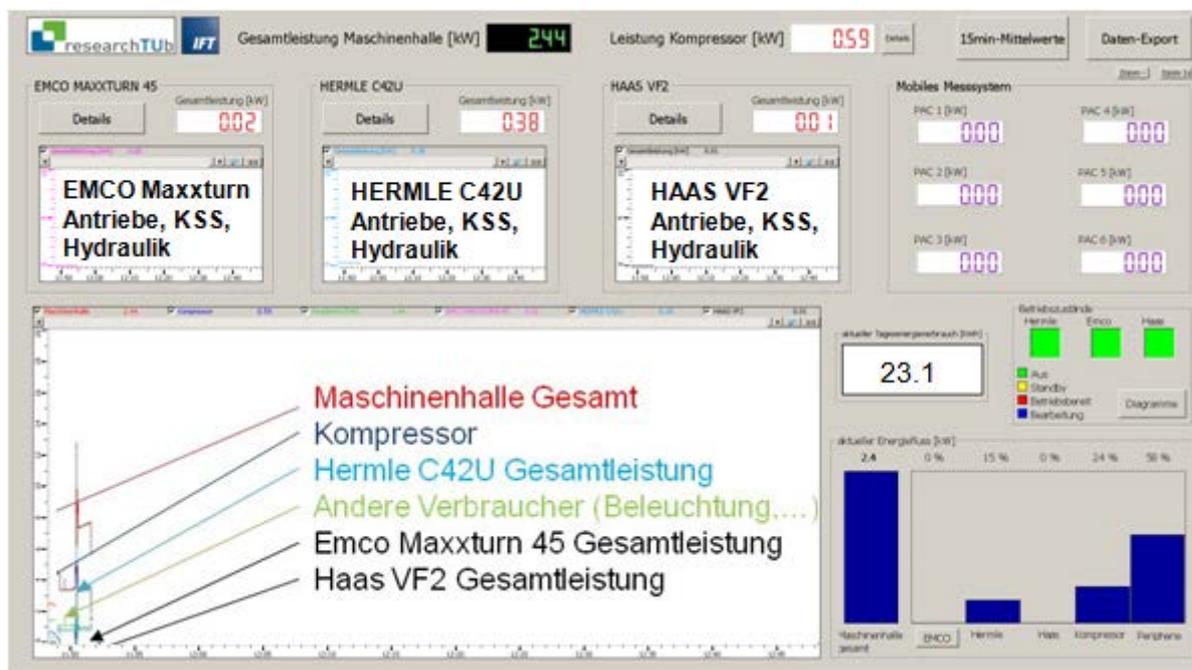


Abbildung 40: WinCC OA-Hauptpanel für die Aspern IQ mi-factory

Im unteren Teil des Panels werden die Gesamtleistungen der Maschinen sowie die Kompressor- und die Maschinenhallenleistung in einem Diagramm angezeigt. Im oberen Teil können die Detailansichten der einzelnen Maschinen ausgewählt werden. Hier werden die Leistungen der verschiedenen Komponenten in Diagrammform und als Momentanwert ausgegeben. Zudem werden die aktuelle Gesamtleistungsaufnahme der Maschinen und der aktuelle Tagesenergieverbrauch in Displays angezeigt. Zusätzlich werden der aktuelle Anteil jeder Maschine am Gesamtleistungsverbrauch und der Anteil jeder Maschinenkomponente am zugehörigen Maschinenleistungsverbrauch in Balkendiagrammen gezeigt. Ein Beispiel dafür skizziert Abbildung 41.

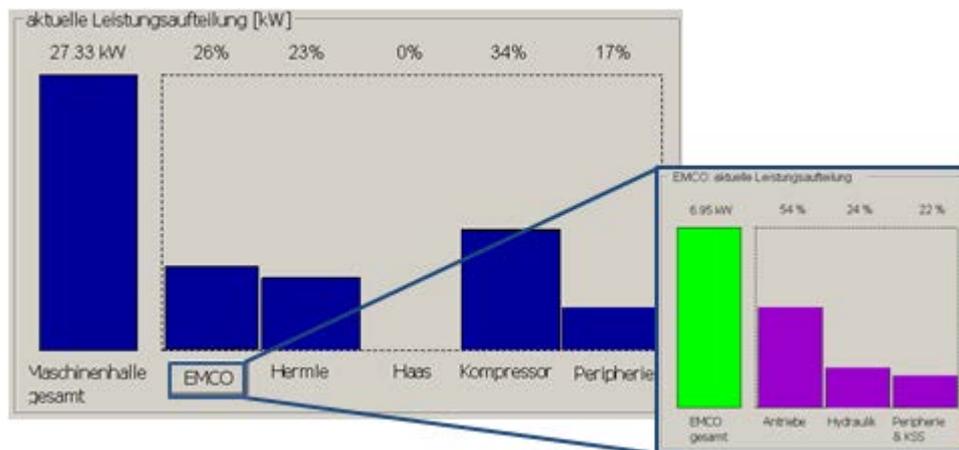


Abbildung 41: Leistungsaufteilung der gesamten Halle und für eine Maschine

Die aktuellen Werte der Datenpunkte werden in bestimmten Zeitintervallen in einer Datenbank mit dem zugehörigen Zeitstempel abgespeichert und können über den Datenbankmanager aus der Datenbank ausgelesen oder exportiert werden. Nach einem Export können die Daten beispielsweise mit Microsoft Excel weiterverarbeitet werden.

Es gibt zwei Möglichkeiten, auf historische Daten zuzugreifen. Erstens können die Datenbankfunktionen des Datenbankmanagers verwendet werden, um Werteabfragen von Datenpunkten und -elementen durchzuführen. Zweitens ist es möglich, mit einem eigenen Panel auf Basis von SQL (Structured Query Language) Abfragen aus der Datenbank durchzuführen. Das SQL-Panel erlaubt mit Hilfe von SQL-Statements Abfragen von aktuellen sowie archivierten Daten aus der WinCC OA-Datenbank. Es stehen Funktionalitäten zur Verfügung, die eine detaillierte Abfrage auf einzelne Teile von Datenpunkten erlauben. Das als Datenfeld zurückgegebene Ergebnis kann gefiltert und bearbeitet werden. Beim Export werden die Daten im Dateiformat „csv“ (Comma-Separated Values) gespeichert und können mit Microsoft-Excel aufbereitet werden. Ein in Excel aufbereiteter Lastgang ist in Abbildung 42 ersichtlich. Hierbei handelt es sich um die zeitliche Abbildung der Maschinengesamtleistung und der Leistung der Antriebe für das EMCO Maxxturn 45-Drehzentrum für eine bestimmte Bearbeitungssequenz.

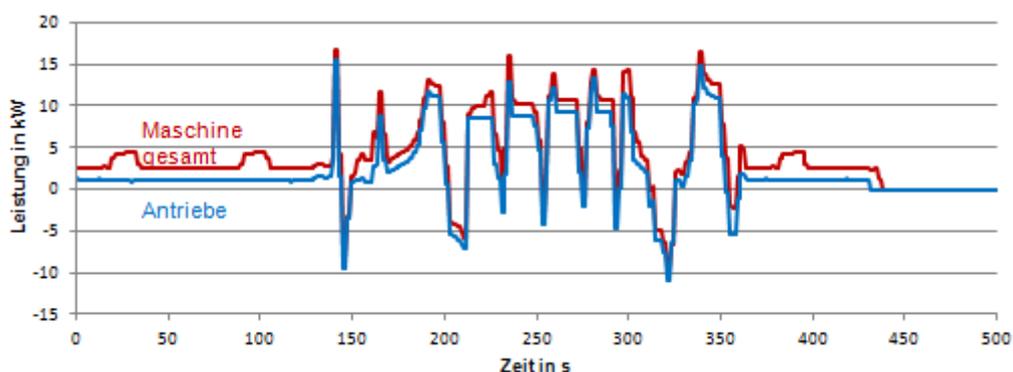
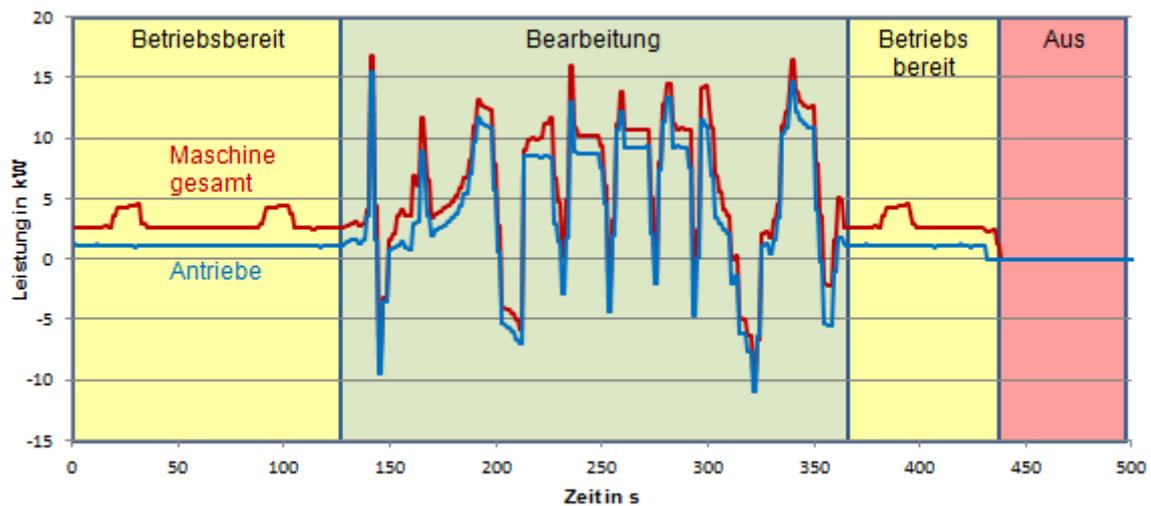


Abbildung 42: Beispiel für einen Lastgang

## 5.2 Bestimmung der Betriebszustände

Dieses Kapitel beschreibt die Erfassung der aktuellen Betriebszustände der Maschinen, entweder anhand von Signalen aus der Steuerung oder über die Ableitung aus der aktuellen Leistungsaufnahme der Maschine bzw. Komponenten. In Abbildung 43 ist ein Beispiellastgang einer Maschine abgebildet.



**Abbildung 43: Beispiel für die Leistungsaufnahme einer Maschine in verschiedenen Betriebszuständen**

In diesem Beispiel ist die Leistungsaufnahme in verschiedenen Betriebszuständen zu erkennen. Die blaue Kurve stellt die Leistungsaufnahme der gesamten Maschine dar, in rot ist die Leistungsaufnahme der Antriebe ersichtlich. In bestimmten Zuständen kann die Leistungsaufnahme als konstant angesehen werden, beispielsweise im Zustand „aus“. Andere Zustände zeigen eine sich periodisch ändernde Leistungsaufnahme, wie beispielsweise die Gesamtleistungsaufnahme im Zustand „betriebsbereit“. Im vorliegenden Fall ist dies auf die periodische Zuschaltung einer Hydraulikpumpe zurückzuführen. Der Lastgang im Zustand „Bearbeitung“ ist hingegen, nachvollziehbarer Weise vom Bauteil und den damit verbundenen Bearbeitungsschritten abhängig.

### 5.2.1 Bestimmung der Betriebszustände über Steuerungsdaten

Mittels WinCC OA-Para ist es möglich, verschiedene Signale aus der Maschinensteuerung auszulesen und zu verarbeiten. Diese Möglichkeit wurde an der SIEMENS SINUMERIK 840D sl Steuerung des Drehzentrums EMCO Maxxturn 45 erprobt. Siemens stellt eine Reihe von Dokumenten zur Verfügung, in denen Adressen zum Auslesen von Signalen aus verschiedenen Nahtstellen der Steuerung angegeben werden. Für die SINUMERIK 840Dsl finden sich hier beispielsweise die folgenden Dokumente: [58], [59], [60], [61], aus welchen die nachfolgenden Informationen zusammengestellt wurden.

Während des Betriebes der NC-Steuerung treten unterschiedliche interne Zustände auf. Ebenso können sich systemspezifische Daten während des Betriebes ändern. Signale werden an verschiedenen Nahtstellen ausgetauscht. Man unterscheidet:

- Nahtstelle SPS/NC-Kern
- Nahtstelle SPS/HMI
- Nahtstelle SPS/Maschinensteuertafel

Teilweise können diese Signale mit Hilfe von Adressen abgegriffen werden, um aktuelle Informationen der Maschine anzeigen lassen zu können. Wichtige Informationen, die aus diesen Signalen abgeleitet werden können, sind beispielsweise die folgenden:

- Betriebsart (Auto/MDA/JOG)
- Programmzustand (z.B. läuft, unterbrochen)
- Aktuelle M-Befehle
- Aktuelle G-Befehle

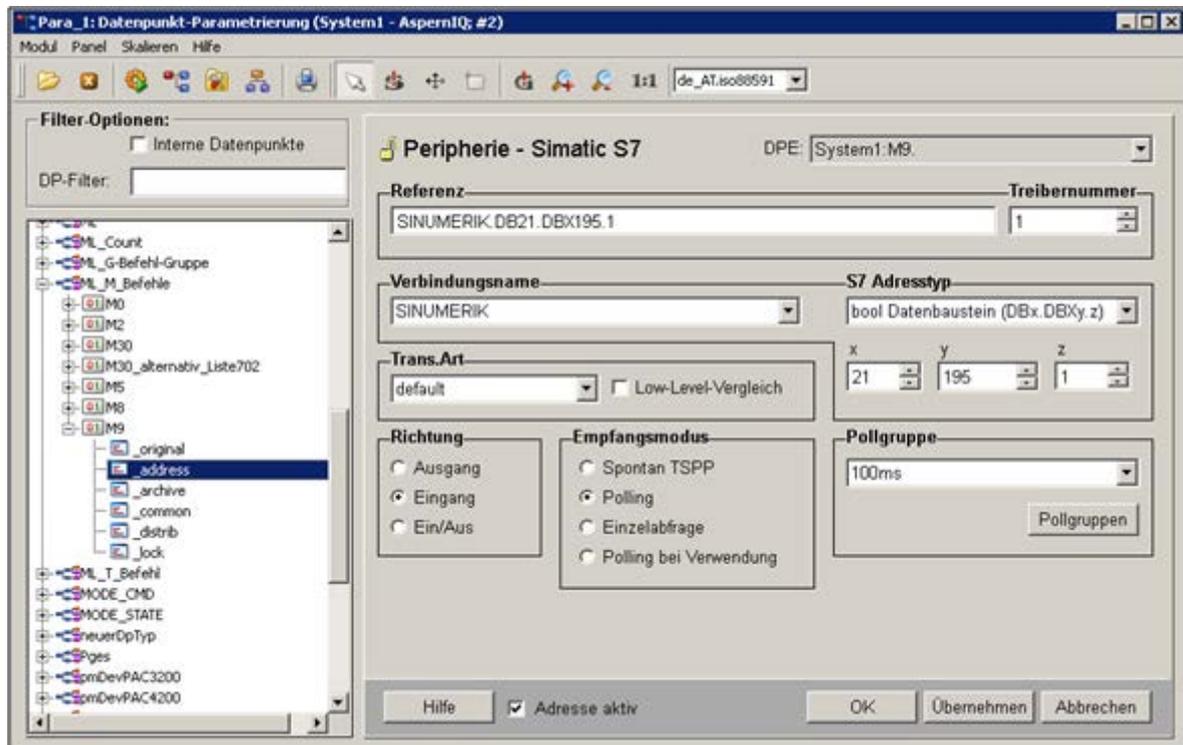
In Tabelle 5 sind die wichtigsten Signale, welche im Zuge der vorliegenden Arbeit aus WinCC OA ausgelesen werden sowie deren Adressen zusammengefasst. Die übrigen, hier nicht angeführten, jedoch implementierten Adressen können dem Anhang dieser Arbeit (siehe Seite 107) entnommen werden.

**Tabelle 5: Adressen einiger wichtiger Steuerungssignale**

Bezeichnung	Adresse	Beschreibung
<b>M30/M02 aktiv</b>	.DB21.DBX33.5	Ende eines Teileprogramms
<b>G-Gruppe 1</b>	.DB21.DBB215	Aktive G-Funktion der Gruppe 1 (Bewegungsbefehle)
<b>Auto</b>	.DB11.DBX6.2	Aktive Betriebsart: Automatikbetrieb
<b>JOG</b>	.DB11.DBX6.0	Aktive Betriebsart: Jog-Betrieb
<b>MDA</b>	.DB11.DBX6.1	Aktive Betriebsart: MDA-Betrieb
<b>Prg. läuft</b>	.DB21.DBX35.0	NC-Programm wird bearbeitet
<b>Prg. angehalten</b>	.DB21.DBX35.2	NC-Programm abgeschlossen oder angehalten
<b>Prg. abgebrochen</b>	.DB21.DBX35.4	NC-Programm abgebrochen
<b>Not-Aus</b>	.DB10.DBX56.1	Not-Aus-Einrichtung aktiviert

Zur Implementierung in WinCC OA-Para muss zunächst ein Datenpunkt angelegt werden. Zur Verwaltung der Peripherie-Adressen von Datenpunktvariablen dient der Konfigurationsauswahlpunkt „\_address“. Dieses Parametrieremenü wird aufgerufen, wenn die Peripherie-Adresse eines Datenpunktelements parametrieren soll.

Darin kann zwischen verschiedenen Treibertypen ausgewählt werden, welche im jeweiligen Projekt verwendet werden. Danach können die Adresse und die Verbindungseinstellungen, wie in Abbildung 44 exemplarisch gezeigt, eingegeben werden.



**Abbildung 44: Parametrierung eines Datenpunkts zur Integration eines Signals aus der Steuerung in WinCC OA**

Die zu tätigen Eingaben sind nachfolgend aufgelistet:

- Verbindungsname: Name, über den die Kommunikation erfolgt
- Richtung: Definiert, ob die Werte eines Datenpunktelements in die Senderichtung (Ausgang), in die Empfangsrichtung (Eingang) oder in beide Richtungen (Ein/Aus) gesendet werden
- S7-Adresstyp: Adresse, die dem Datenpunktelement beim Peripheriegerät zugewiesen wird
- Trans.Art: Die Transformationsart ist die Interpretation der auf dem Peripheriegerät gelesenen Daten (z.B. float, integer)
- Empfangsmodus: Für den Eingang kann als Empfangsmodus „Spontan“, „Polling“ oder „Einzelabfrage“ definiert werden
- Pollgruppe: Im Gegensatz zur spontanen Abfrage ist „Polling“ eine zyklische Abfrage. Das gewünschte Pollintervall mit den einzelnen Polling-Parametern muss nicht für jedes Datenpunktelement definiert werden, sondern kann in einer Pollgruppe zusammengefasst werden.

## 5.2.2 Bestimmung der Betriebszustände über Messwerte

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der aktuellen Betriebszustände einer Maschine ist die Zuweisung von Messwerten, beispielsweise aus der Leistungsmessung, zu bestimmten Betriebszuständen. Hierzu muss im Vorfeld eine definierte Vermessung der Maschine oder spezieller Maschinenkomponenten durchgeführt werden, um die benötigten Leistungsniveaus bestimmen zu können. In Abbildung 45 ist der Lastgang der Antriebsleistung aus Abbildung 43 in Kombination mit den zugehörigen Leistungsbändern für die Erfassung der Betriebszustände dargestellt.

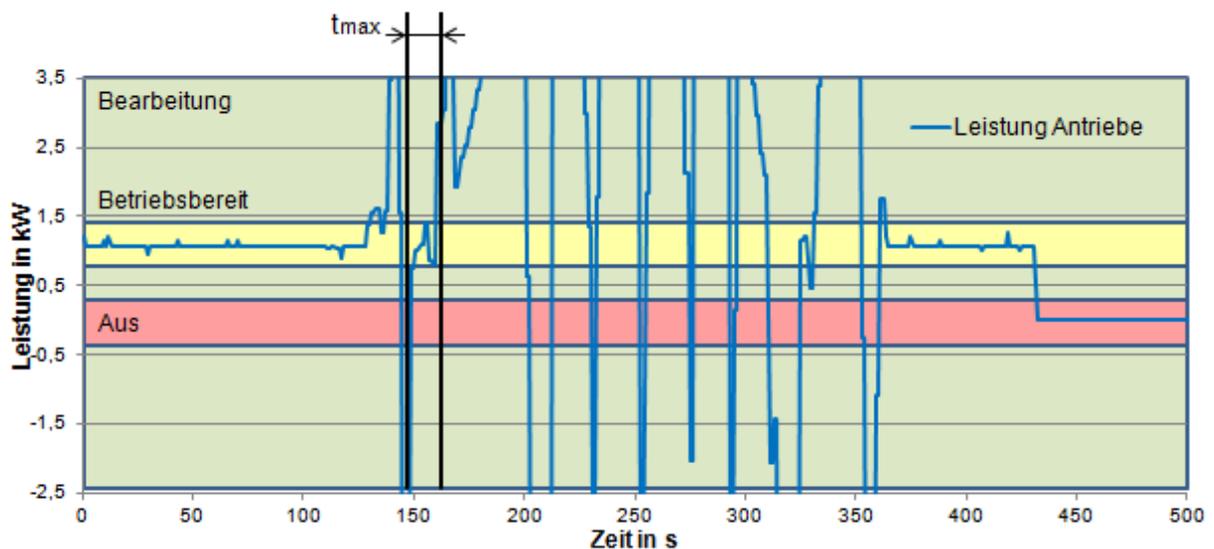


Abbildung 45: Bestimmung des Betriebszustandes über definierte Leistungsbänder

In diesem Beispiel sind die Betriebszustände „aus“, „betriebsbereit“ und „Bearbeitung“ dargestellt. „aus“ und „betriebsbereit“ haben dabei ein ähnliches konstantes Leistungsniveau. Dennoch sind typischerweise Schwankungen im Verlauf ersichtlich. Aus diesem Grund wird jeweils eine obere sowie untere Grenze definiert und hierdurch ein Bandbereich erzeugt, innerhalb dessen der jeweilige Betriebszustand gesetzt wird. Die Grenzwerte für die betrachteten Maschinen sind in Tabelle 6 angegeben. Da der Lastgang während „Bearbeitung“ ein dynamisches Verhalten aufweist, wobei die Bänder der anderen Zustände durchlaufen werden, bedarf dieser Zustand einer genaueren Untersuchung.

Tabelle 6: Grenzwerte für die Bestimmung der Betriebszustände

Grenze	EMCO Maxxturn 45		HERMLE C42U		HAAS VF2	
	untere	obere	untere	obere	untere	obere
AUS	-0,01 kW	0,01 kW	0 kW	0,18 kW	0 kW	0,02 kW
Betriebsbereit	0,15 kW	0,32 kW	0,85 kW	1,1 kW	0,08 kW	0,28 kW
Überbrückungszeit	3 Sekunden		4 Sekunden		4 Sekunden	

Die Leistungsaufnahme während einer Bearbeitung ist, aufgrund der angetriebenen Spindeln, im Allgemeinen höher als in den anderen Zuständen. Innerhalb der Bearbeitung kommt es jedoch typischerweise mehrmals zum Stillstand der Spindeln und damit zu einem Abfall der Leistung auf das Niveau „betriebsbereit“. Mit einer entsprechenden Gleichrichterschaltung kann während eines Bremsvorgangs der Spindel sogar Energie ins Netz zurückgespeist werden. In Abbildung 46 ist die Leistungsaufnahme der Antriebe und die Drehzahl der Hauptspindel während eines Beschleunigungs- und Bremsvorgangs dargestellt. Im Diagramm ist auch die zurückgespeiste Energie während des Bremsvorgangs eingezeichnet. Während dem Bremsvorgang durchläuft die Lastganglinie die Bänder „betriebsbereit“ und „aus“. Um trotzdem den richtigen Zustand anzeigen zu können, muss die maximale Zeit eines Bremsvorgangs im Vorfeld experimentell bestimmt werden. Diese Zeit muss bei der Programmierung der Anzeige berücksichtigt werden und ein Zustandswechsel darf erst nach Verstreichen dieser Überbrückungszeit erfolgen.

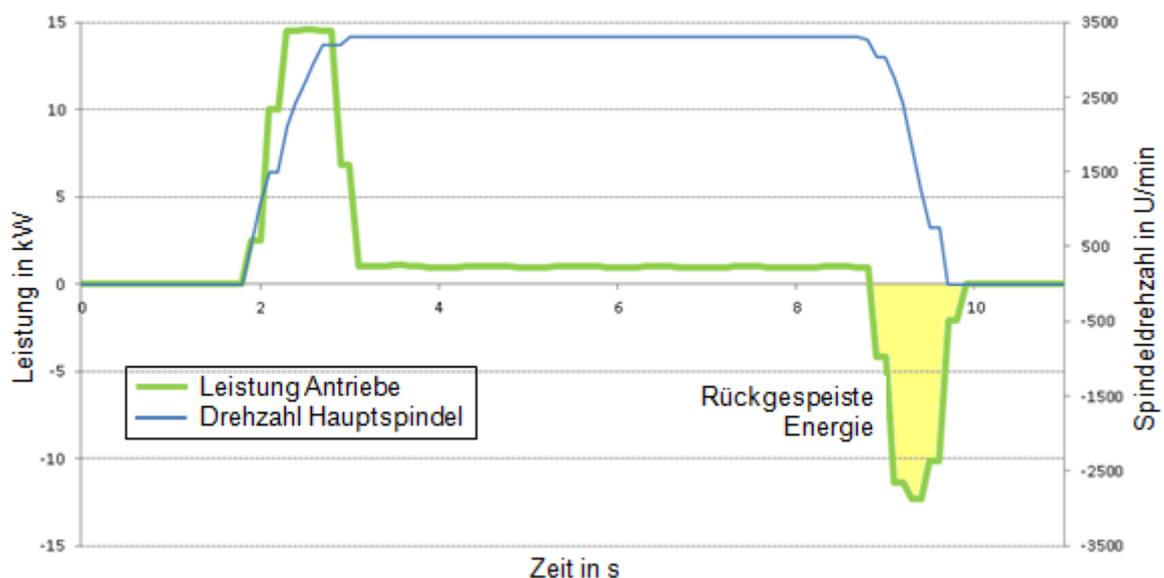


Abbildung 46: Energierückführung während eines Bremsvorganges der Spindel

Die Programmierung erfolgt in WinCC OA-Gedi. Hier kann mittels der Control-Sprache ein Panel erzeugt werden, welches die Grenzwerte und Verknüpfungen der Datenpunktelemente überwacht. Ebenfalls können die Panels zur Visualisierung direkt in Gedi programmiert werden. Neben einigen WinCC OA-spezifischen Befehlen basiert die Programmierung auf der Programmiersprache C. In Abbildung 47 sind die Panels zur Darstellung der Betriebszustände in WinCC OA dargestellt. Quellcodes finden sich im Anhang auf Seite 118.

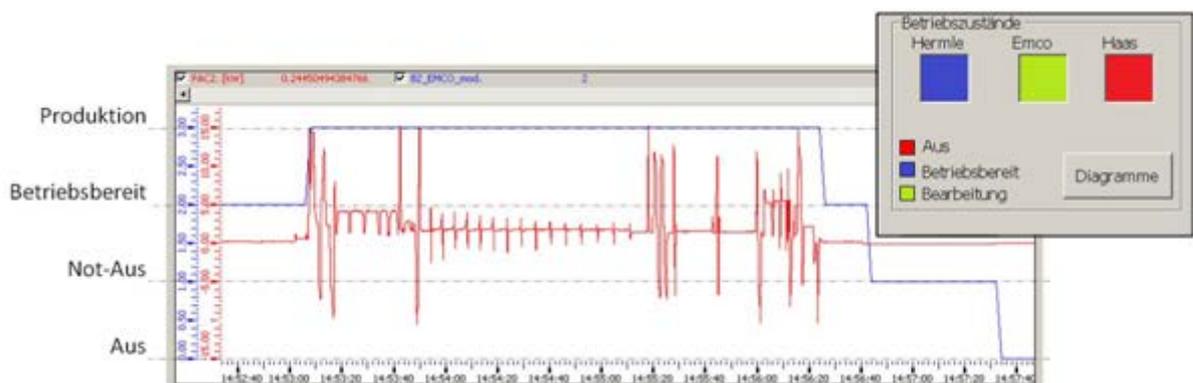


Abbildung 47: Darstellung der Betriebszustände mit WinCC OA

Mit Hilfe der Zustandserfassung ist es möglich, die Zeitanteile der Maschinen in den bestimmten Zuständen in Echtzeit auszugeben. Zudem kann eine Tabelle generiert werden, welche die Zeitpunkte der Zustandswechsel aufzeichnet. Solch eine Tabelle stellt die Datenbasis für ein zustandsbasiertes Simulationsmodell dar. Wie in Abbildung 48 ersichtlich, können ebenfalls die Bearbeitungszeiten und die Energie-pro-Stück-Werte für die einzelnen Bauteile in Echtzeit ausgegeben und für eine etwaige Simulation exportiert werden.

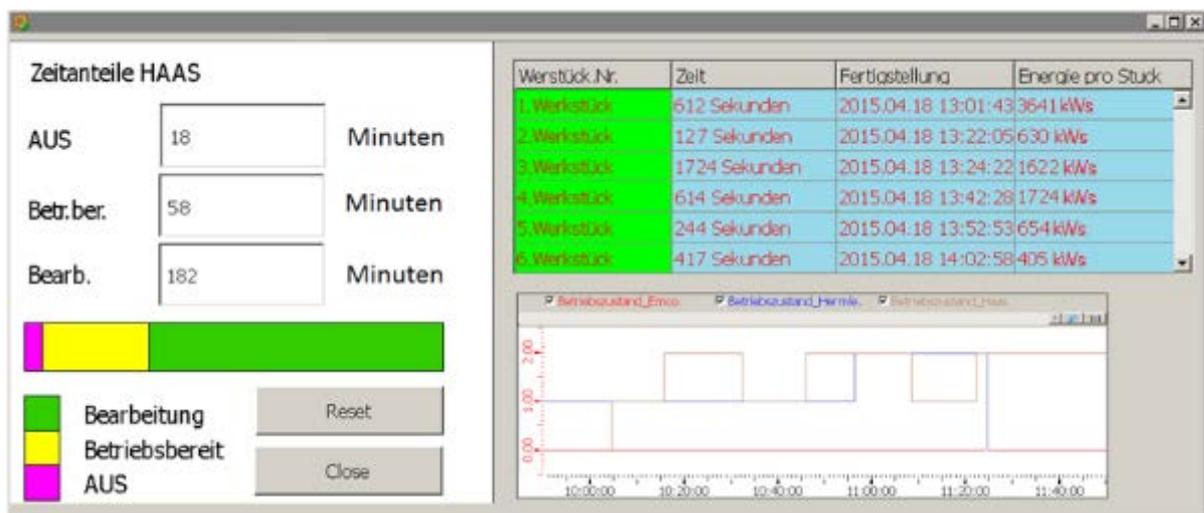


Abbildung 48: Exemplarische Ausgabe der Zeitanteile in verschiedenen Betriebszuständen, Zeitpunkte der Zustandswechsel und Energie-pro-Stück in WinCC OA-Vision

### 5.3 Datenerhebung in der Aspern IQ mi-Factory

Durch die Erweiterung des Monitoringsystems in der mi-Factory wurden die Rahmenbedingungen für die automatische Aufnahme von Daten für die Simulation gesetzt. Die integrierte Betriebszustandserfassung ermöglicht die automatische Aufzeichnung und Speicherung von Lastgängen für Bauteile und die benötigten Zeiten. Abbildung 49 zeigt den Informationsfluss aus dem realen System in die Simulation.

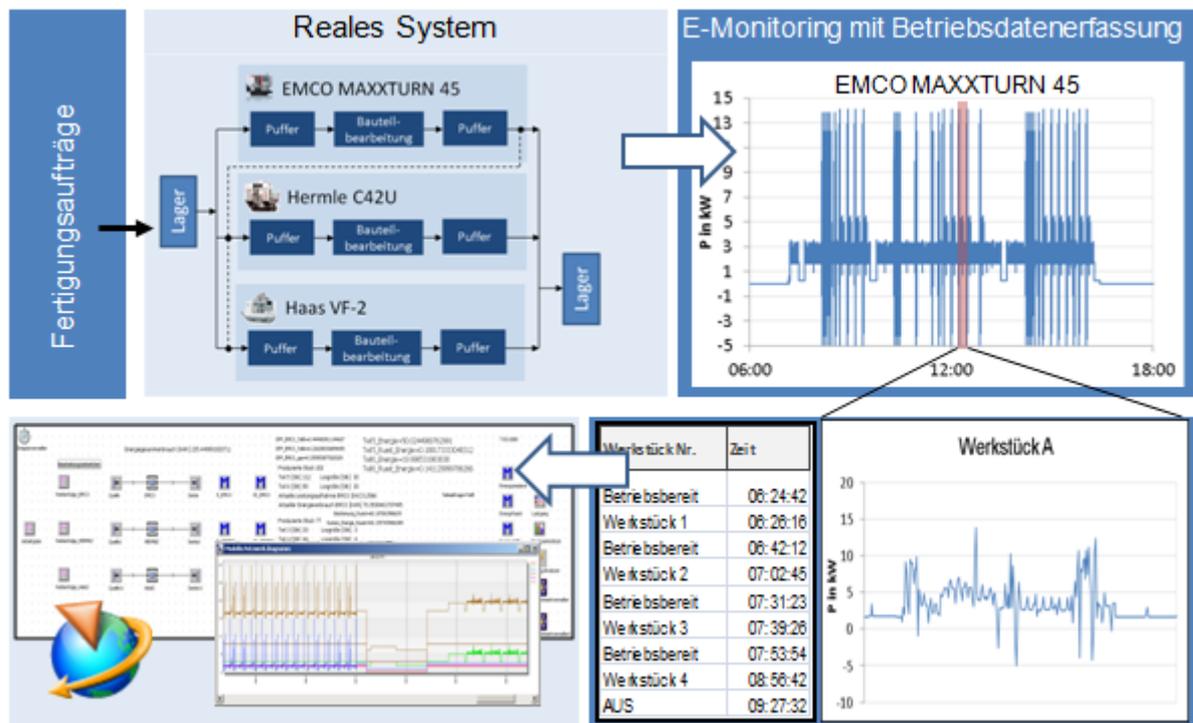


Abbildung 49: Systemskizze Erfassung der Betriebs- und Maschinendaten für die Simulation

Für die Simulation benötigt man zum einen Informationen über den Energieverbrauch, also die Lastgänge der einzelnen Bauteile, sowie die Leistungsaufnahmen während der Rüst-, Werkstückwechsel-, Bearbeitungs- und Stillstandzeiten. Zum anderen benötigt man Informationen über die Zeiten der Maschinenzustände, also zu welchen Zeitpunkten und wie lange gefertigt wurde und die Maschine ausgeschaltet bzw. betriebsbereit war. Diese Daten werden durchgehend in der WinCC OA-Datenbank gespeichert.

Beim Exportieren der Daten aus WinCC OA kann ein Zeitraum ausgewählt werden, für den die gewünschten Daten abgefragt werden. Es wird zunächst eine csv-Datei erstellt, welche in weiterer Folge in einem Programm, beispielsweise Microsoft Excel, aufbereitet werden kann. In Excel wird dabei ein Makro verwendet, um die Struktur der Daten automatisch in eine einfach verwertbare tabellarische Form zu bringen.

Die zeitliche Erfassung der Zustandsänderungen hilft, die Datenmengen zu reduzieren, indem ausschließlich Leistungsdaten aus den Zeiträumen exportiert

werden, in denen auch gefertigt wurde. Für die restlichen Zustände, in denen die Leistungsniveaus als konstant angenommen werden, sind ausschließlich die Zeitstempel der Zustandsänderungen von Relevanz.

In Abbildung 50 sind Daten für Bauteile angeführt, die in der mi-Factory an den verschiedenen Maschinen aufgenommen wurden. Diese Bauteile bzw. Bearbeitungsschritte wurden mit den zugehörigen Lastgängen für die Simulationsexperimente herangezogen.

<b>EMCO MAXXTURN 45</b>  Spannhülse	<b>HERMLE C42U</b>  Turbinenschaufel Schruppbearbeitung 1	<b>HAAS VF-2</b>  Vorderteil Smartwash			
Rüstzeit $t_r$	11,1 min	Rüstzeit $t_r$	6,7 min	Rüstzeit $t_r$	7 min
Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	3,8 min	Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	5,4 min	Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	2,5 min
Bearbeitungszeit $t_b$	3,7 min	Bearbeitungszeit $t_b$	9,6 min	Bearbeitungszeit $t_b$	25 min
<b>EMCO MAXXTURN 45</b>  Hinge Bottom	<b>HERMLE C42U</b>  Turbinenschaufel Schruppbearbeitung 2	<b>HAAS VF-2</b>  Hinterteil Smartwash			
Rüstzeit $t_r$	11,3 min	Rüstzeit $t_r$	9,3 min	Rüstzeit $t_r$	5 min
Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	3,8 min	Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	5,4 min	Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	2,5 min
Bearbeitungszeit $t_b$	3,1 min	Bearbeitungszeit $t_b$	6,9 min	Bearbeitungszeit $t_b$	17,8 min
<b>EMCO MAXXTURN 45</b>  Hinge Top	<b>HERMLE C42U</b>  Turbinenschaufel Schlichtbearbeitung 1	<b>HAAS VF-2</b>  Mounting Plate			
Rüstzeit $t_r$	16,4 min	Rüstzeit $t_r$	12,5 min	Rüstzeit $t_r$	20,8 min
Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	3,8 min	Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	5,4 min	Werkstückwechselzeit $t_{ww}$	2,5 min
Bearbeitungszeit $t_b$	7,9 min	Bearbeitungszeit $t_b$	13,2 min	Bearbeitungszeit $t_b$	9,1 min

**Abbildung 50: In der mi-Factory aufgenommene Daten der Bauteilbearbeitungen**

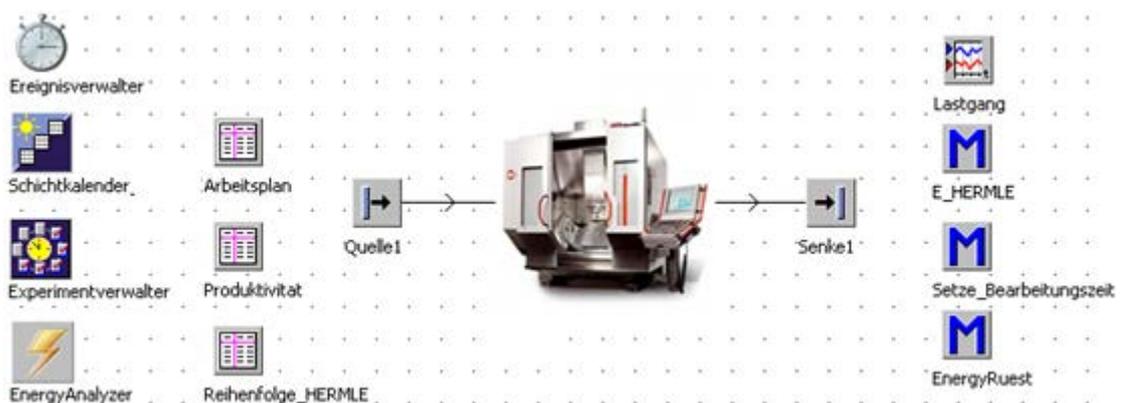
Bei den Teilen „Spannhülse“, „Hinge Top“, „Hinterteil Smartwash“ und „Vorderteil Smartwash“ handelt es sich um Teile, die direkt aus einem Halbzeug gefertigt wurden. Den Teilen „Mounting Plate“ und „Hinge Bottom“ gehen Bearbeitungsschritte an anderen Maschinen voraus. Auf der HERMLE C42U wurde eine Turbinenschaufel als Prototyp gefertigt. Die Bearbeitung wurde dadurch öfter unterbrochen, wodurch sich gegenüber einer Serienfertigung eine deutlich höhere Gesamtbearbeitungszeit einstellte. Um die Lastgänge für die Simulation verwenden zu können, wurden einzelne Bearbeitungsschritte aufgenommen und in der Simulation als eigene Teile verwendet.

## 5.4 Modellierung der Simulationsumgebung

Zur Modellierung des Fertigungssystems wird die Simulationsumgebung Plant Simulation-Version 11 eingesetzt. Im Folgenden werden der im Zuge dieser Arbeit durchgeführte Aufbau des Simulationsmodells und die darin auftretenden Besonderheiten erläutert. Ausgehend vom Aufbau des Modells für eine Maschine soll dabei letztlich die Entwicklung des Simulationsmodells für die gesamte mi-Factory erklärt werden.

### 5.4.1 Modellierung einer Werkzeugmaschine

In Abbildung 51 ist der Modellaufbau für eine Maschine am Beispiel des Bearbeitungszentrums HERMLE C42U dargestellt.



**Abbildung 51: Verwendete Bausteine bei der Darstellung einer Werkzeugmaschine in Plant Simulation**

Bei der Modellierung werden hauptsächlich folgende Objekte eingesetzt:

- Ereignisverwalter
- Quelle
- Senke
- Tabelle
- Diagramm
- Energy Analyzer
- Methode
- Schichtkalender
- Netzwerk

Um die Besonderheiten des vorliegenden Simulationsprogrammes ersichtlich zu machen, ist es notwendig, zunächst die generell verwendeten Objekte darzustellen, um in weiterer Folge deren Verwendung für den vorliegenden Fall erläutern zu können. Die nachfolgende Beschreibung der Objekte erfolgt dabei in Anlehnung an [57].

## **Ereignisverwalter**

Der Ereignisverwalter koordiniert und synchronisiert die Ereignisse, welche während des Simulationslaufes stattfinden und ist somit für die zeitliche Steuerung des Simulationsablaufs zuständig. Der Benutzer hat die Möglichkeit, die Simulation zu starten, anzuhalten, zu pausieren und die Simulationsgeschwindigkeit zu ändern. Dies ist vor allem in der Modellierungsphase von Vorteil, da das Verhalten einzelner Komponenten und Teilbereiche genauer betrachtet werden kann. Außerdem kann hier ein Datum für den Start und das Ende der Simulation festgelegt sowie der Rücksetzbefehl gegeben werden.

## **Quelle und Senke**

Die Quelle erzeugt bewegliche Elemente (BE), die sich durch das Simulationsmodell bewegen können. In der Realität entspricht die Quelle dem Wareneingang einer Fabrik oder einer Maschine, welche Teile produziert, die durch andere Maschinen bearbeitet werden. Vom Benutzer kann festgelegt werden, ob verschiedene Teiletypen hintereinander, in gemischter Reihenfolge oder in einer bestimmten Losgröße produziert werden. Im vorliegenden Simulationsmodell kann die Reihenfolge und Anzahl der zu produzierenden Teile in tabellarischer Form eingegeben werden oder es wird eine Gesamtanzahl je Teiletyp und eine Losgröße festgelegt. Es wird dann solange in dieser Losgröße produziert, bis die Gesamtanzahl gefertigt wurde. Die Senke entfernt die Teile aus der Einrichtung, nachdem sie die Bearbeitungsstationen durchlaufen haben. In der Realität entspricht die Senke dem Warenausgang.

## **Tabelle**

Eine Tabelle steht für viele Anwendungen zur Verfügung. Sie ist eine Liste mit mehreren Spalten, die über deren Index wahlfreien Zugriff auf einzelne Zellen ermöglicht. Es können Werte und Verweise an ein Objekt weitergeleitet oder empfangen werden. Während einer Simulation können zusätzliche Zeilen und Spalten erzeugt und bearbeitet werden. Im vorliegenden Modell werden Tabellen zur Informationsversorgung der Ressourcen und zur Berichterstattung nach einem Simulationslauf genutzt. Die Tabelle „Arbeitsplan“ enthält dabei beispielsweise Bearbeitungs- und Rüstzeiten sowie die Werte des Lastgangs für die Teile, die auf der entsprechenden Maschine gefertigt werden. Die Tabelle „Reihenfolge\_HERMLE“ enthält die Produktionsreihenfolge mit der zu fertigenden Stückzahl und liefert der Quelle die Informationen zur Erzeugung der BE.

## Diagramm

Ein Diagramm zeigt in Plant Simulation-Daten grafisch an. Auf diese Weise können Ergebnisse von Simulationsläufen schnell ausgewertet und präsentiert werden. Das Diagramm kann den Inhalt einer Tabelle oder von Attributen eines Objekts anzeigen. Es wird benutzt, um die Anzahl der produzierten Teile je Maschine, die Zeitanteile in den Betriebszuständen oder den zeitlichen Verlauf der simulierten Leistungsaufnahme anzuzeigen.

## Energy Analyzer

Plant Simulation stellt mehrere Auswertungswerkzeuge zur Verfügung. Neben den Analysewerkzeugen für den Materialfluss (z.B. Engpassanalyse oder Sankey-Diagramm) kann mittels der Energieanalyse der Energieverbrauch der ausgewählten Maschinen analysiert werden. Dabei werden automatisch Energieverbrauchsdaten gesammelt und in einer Tabelle ausgewertet, Diagramme des Energieverbrauchs in verschiedenen Betriebszuständen erstellt und der zeitliche Verlauf der Leistungsaufnahme geplottet.

## Schichtkalender

Mit dem Schichtkalender können verschiedene Schichten festgelegt werden, in denen die Ressourcen arbeiten. Im Falle eines Schichtendes werden eine oder mehrere Maschinen im Modell pausiert, indem die booleschen Attribute „Pause“ bzw. „ungeplant“ gesetzt werden.

## Netzwerk

Das Netzwerk dient zur Erstellung eines hierarchisch strukturierten Simulationsmodells. Es ist eine Ebene, in der mindestens zwei Objekte miteinander verbunden sind. Es repräsentiert beispielsweise die ganze Fertigungshalle oder auch nur eine Maschine darin. In einem Netzwerk können Objekte zu einem Objekt mit höherer Funktionalität kombiniert werden. Das neu erstellte Objekt, das beispielsweise eine komplizierte Maschine darstellt, kann wie jedes andere Objekt verwendet werden. Diese hierarchische Struktur wird im vorliegenden Modell beispielsweise dazu verwendet, um die Berechnung des Energieverbrauchs einer Maschine zufolge des elektrischen und des pneumatischen Verbrauchs zusammenzufassen. Das bedeutet, dass dem Baustein HERMLE in Abbildung 51 eine weitere Ebene hinterlegt ist, welche zur Berechnung des elektrisch äquivalenten Maschinengesamtverbrauchs dient.

## **Methode**

Sim Talk ist eine Informationsflusssprache, welche das Grundverhalten der Plant Simulation-Bausteine erheblich erweitert. Mit Sim Talk können die Grundbausteine modifiziert werden, wodurch die Generierung von praxisnahen Systemmodellen oft erst ermöglicht wird. Ein Methodenbaustein dient dazu, Steuerungen mittels Sim Talk zu programmieren, welche dann von Grundbausteinen aufgerufen bzw. gestartet werden können (vgl. [32] Seite 89f). Ein Beispiel für eine derartige Programmierung kann anhand von Abbildung 53 (siehe Seite 84) gezeigt werden.

Im dargestellten Modell werden Methoden beispielweise für die Ermittlung der Energie-pro-Stück-Werte, zum Setzen von Bearbeitungs- und Rüstzeiten oder zur Berechnung der elektrischen Druckluftäquivalenz aus Durchfluss und Druck verwendet. Die Berechnung und Darstellung der Lastgänge während einer Bearbeitung geschieht ebenfalls in einer Methode. Dies wird im folgenden Kapitel genauer beschrieben.

### **5.4.2 Implementierung der simulierten Leistungsaufnahme**

Plant Simulation stellt Funktionen zur Verfügung um den Energieverbrauch von Materialflussobjekten aufzuzeichnen und statistisch auszuwerten. Dazu sind den Objekten Registerkarten hinterlegt, in welchen die Leistungsaufnahmen in bestimmten Zuständen eingetragen werden können. Außerdem kann das energetische Verhalten zwischen zwei Zuständen bestimmt werden. In einer Energiestatistik können Statistikwerte der Energiezustände angezeigt werden. In Abbildung 52 ist ein Beispiel für die Energie-Registerkarte und die Energiestatistik einer Maschine ersichtlich. Energiestatistiken können für mehrere Ebenen generiert werden. Im vorliegenden Fall wären dies:

- Energieverbrauch aufgrund der elektrischen Leistungsaufnahme und des Druckluftverbrauchs für eine Maschine
- Gesamtenergieverbrauch pro Maschine
- Gesamtenergieverbrauch für alle Objekte, die in einem Netzwerk eingesetzt sind



**Abbildung 52: Beispiel einer Energie-Registerkarte und der Energiestatistik für ein Materialfussobjekt in Plant Simulation**

Während einer Bearbeitung ist die Leistungsaufnahme der Ressource nicht konstant und kann deshalb nicht einfach im Feld „Arbeitend“ eingetragen werden (siehe Abbildung 52). Hierzu ist die Programmierung einer Methode notwendig, welche von der Ressource beim Start einer Bearbeitung aufgerufen wird und den Lastgang für das bearbeitete Werkstück in einem bestimmten Zeitabstand an die Ressource übergibt. Der Quellcode dieser Methode ist in Abbildung 53 dargestellt.

```

1  (Teiletyp:string;Zeile:integer)
2  is
3  do
4      Zeile:=Zeile + 1;
5
6      .Modelle.Netzwerk.HERMLE.LeistungsaufnahmeArbeitend :=
7      root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",Teiletyp]
8      ["P_arbeitend",HERMLE]["P_arbeitend",zeile];
9
10 end;

```

```

1  is
2      TT:string;
3      seconds:integer;
4  do
5      TT := @.TeileTyp;
6      seconds := 0;
7
8      .Modelle.Netzwerk.HERMLE.LeistungsaufnahmeArbeitend:=
9      root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",@.TeileTyp]
10     ["P_arbeitend",HERMLE]["P_arbeitend",1];
11
12     if
13         HERMLE.rüstet then
14         while seconds < HERMLE.bearbeitungszeit loop
15
16             ref(CE_HERMLE).methaufr(HERMLE.bearbeitungszeit +
17             HERMLE.Rüstzeit - (HERMLE.bearbeitungszeit -
18             seconds),TT,seconds);
19
20             seconds := seconds + 1
21         end
22     else
23         while seconds < HERMLE.bearbeitungszeit loop
24
25             ref(CE_HERMLE).methaufr(HERMLE.bearbeitungszeit -
26             (HERMLE.bearbeitungszeit - seconds),TT,seconds);
27
28             seconds := seconds + 1
29         end;
30     end;
31 end;

```

Abbildung 53: Quellcode der Methode E\_HERMLE in Plant Simulation

Die Methode „E\_HEMRLE“ wird bei jedem Durchlaufen eines BEs durch den Ausgang der Ressource „HERMLE“ ausgelöst. Wichtig ist, dass die Bearbeitungs- und Rüstzeiten für den jeweils nächsten Teil vor dem erneuten Ausführen dieser Methode gesetzt wurden.

In Zeile 8 ist der Zugriff auf eine Zelle in der Tabelle des Lastgangs des aktuell gefertigten Teiles zu sehen. „@“ steht in Plant Simulation für das BE, welches aktiv ist, während eine Methode auslöst. So steht „@.Teiletyp“ für den aktuellen Teil auf der Ressource „HERMLE“.

Die if-Anweisung von Zeile 12 bis Zeile 21 überprüft, ob die Maschine gerade fertig oder in einem anderen Zustand ist. Die Befehle „ref“ und „Methaufr“ in Zeile 16

verzögern den Aufruf einer referenzierten Methode (Abbildung 53 unten) um eine bestimmte Zeit, welche im nachfolgenden Klammersausdruck berechnet wird. Wenn die Maschine gerade nicht „in Bearbeitung“ ist, zählt diese Funktion die Zeit bis zum Beginn des Zustandes „in Bearbeitung“ herunter. Ab dem Zustandswechsel sendet die Funktion jede Sekunde einen neuen Wert aus der Spalte „P\_arbeitend“ des aktuellen Teils an die Maschine. Damit wird in jeder Sekunde das Attribut „Leistungsaufnahme.Arbeitend“ für die Ressource „HERMLE“ durch den aktuellen Leistungswert aus der Tabelle ersetzt.

Verlässt das fertige Teil die Station, wird zunächst die Methode „Setze Bearbeitungszeit“ ausgelöst. Diese Methode setzt die Bearbeitungs- und Rüstzeit für den nächsten Teil. Danach startet die Methode „E\_HERMLE“ erneut mit den Attributen des nächsten Teils. Die Quellcodes für die Methoden „Setze\_Bearbeitungszeit“ und „BE\_Weiterleiten“ sind dem Anhang auf Seite 115 zu entnehmen. Außerdem sind dort die Quellcodes „EnergyRuest“ und „EnergyPiece“ zu finden, in denen die Energie in bestimmten Zuständen berechnet und für die statistische Auswertung aufbereitet wird.

### 5.4.3 Modellierung des elektrischen Druckluftäquivalents

Um den Druckluftverbrauch in die Leistungsaufnahme des Systems mit einbeziehen zu können, wurde den Maschinen eine weitere Ebene hinterlegt (siehe Abbildung 54), in der einerseits der Energieverbrauch zufolge der elektrischen Leistungsaufnahme und andererseits der Energieverbrauch zufolge der Druckluft gesondert berechnet wird. Durch das Arbeiten mit den hierarchischen Netzwerkstrukturen kann die Energiestatistik übersichtlicher ausgewertet werden. Zusätzlich wird die Erweiterung des Ein-Maschinen-Modells um die restlichen Maschinen erheblich erleichtert und übersichtlicher.

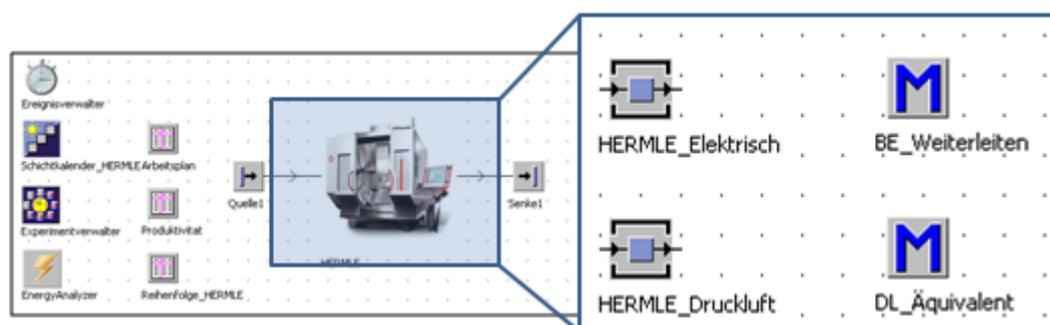


Abbildung 54: Leistungsaufnahme einer Maschine zufolge elektrischer und pneumatischer Anteile

Während die Ressource „HERMLE\_elektrisch“ die Energiedaten direkt aus einer Tabelle mit Messdaten erhalten kann, muss für die fiktive Maschine „HERMLE\_Druckluft“ zunächst das elektrische Druckluftäquivalent (also die antriebsmäßig benötigte Kompressorleistung  $P_K$ ) aus dem gemessenen Druck  $p_L$  und

Durchfluss  $\dot{Q}$  nach der folgenden Formel für eine isentrope Zustandsänderung berechnet werden:

$$P_{K,Modell} = \frac{\dot{Q} \rho c_p T_1}{\eta} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] \quad (15)$$

Dabei werden die folgenden Werte als konstant angenommen:

- Spezifische Wärmekapazität für Luft  $c_p = 1,005 \frac{kJ}{kg K}$
- Temperatur der angesaugten Luft  $T_1 = 293 K$
- Umgebungsdruck  $p_1 = 1 bar$
- Dichte der Luft  $\rho = 1,184 \frac{kg}{m^3}$

Der Wirkungsgrad  $\eta$  des Kompressors und des Druckluftnetzwerkes konnte experimentell über Leistungs- und Druckluftmessungen bestimmt werden. Der Wirkungsgrad ist vom Durchfluss abhängig, wobei der lineare Zusammenhang  $\eta = 0,3 + \frac{\dot{Q}}{5500}$  gilt. Eingesetzt in Formel (13) ergibt sich somit folgender Zusammenhang, der für die Simulation verwendet wird:

$$P_{K,Modell} = \frac{0,006 \dot{Q} (p_2^{0,286} - 1)}{0,3 + \frac{\dot{Q}}{5500}} \quad (16)$$

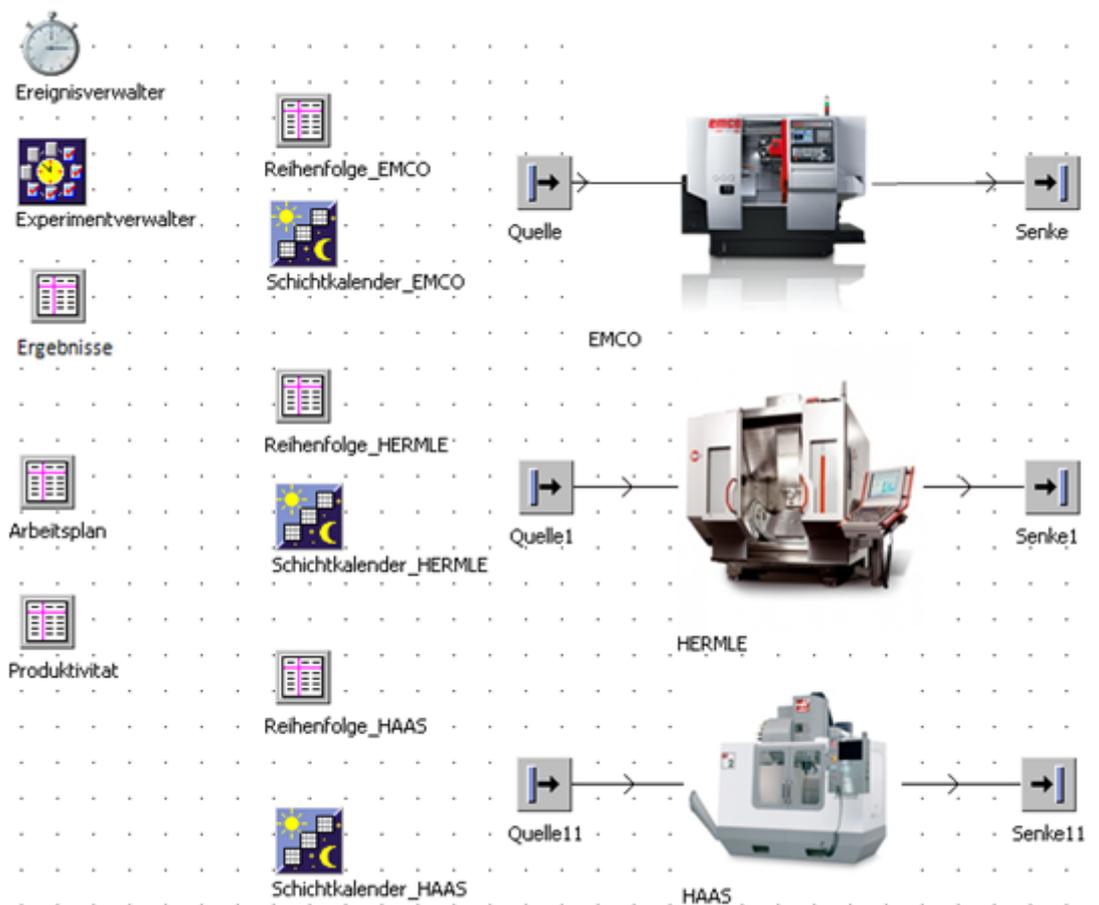
Die Methode „DL\_Äquivalent“ berechnet so das elektrische Druckluftäquivalent und generiert eine Tabelle vom selben Aufbau wie die elektrischen Lastgänge. Der restliche Ablauf erfolgt dann analog zur elektrischen Ressource.

### 5.4.4 Modellierung der gesamten Produktionsanlage

Dieses Kapitel zeigt die Zusammenstellung der einzelnen Maschinen zum Gesamtsystem mi-factory. Das System besteht aus den drei Maschinen:

- EMCO Maxxturn 45
- HERMLE C42U
- HAAS VF-2

und den zugehörigen Steuerungs- und Eingabebausteinen. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 55 ersichtlich.



**Abbildung 55: Gesamtsystem mi-factory in Plant Simulation**

Im Arbeitsplan werden die Informationen und der Lastgang für die Bauteile hinterlegt. In den Tabellen „Reihenfolge\_Maschinenname“ werden die Bearbeitungsreihenfolge und die Losgröße für die einzelnen Maschinen eingetragen. Um die Maschinen unabhängig voneinander ein- und ausschalten zu können, wurde für jede Maschine ein Schichtplan hinterlegt. Wichtige Auswertungen des Energy-Analyzers und der Materialflussanalyse werden in „Ergebnisse“ ausgegeben. In Abbildung 56 ist ein Beispiel für die Ausgabe des simulierten Lastgangs zu sehen, dessen Werte auch exportiert werden können.

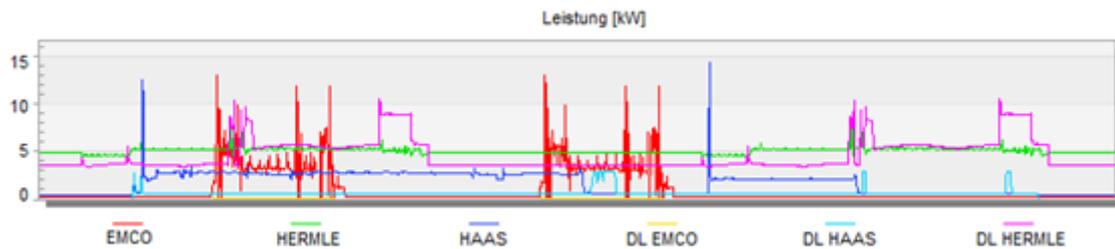


Abbildung 56: Simulierter Lastgang dargestellt mit dem Energy-Analyzer

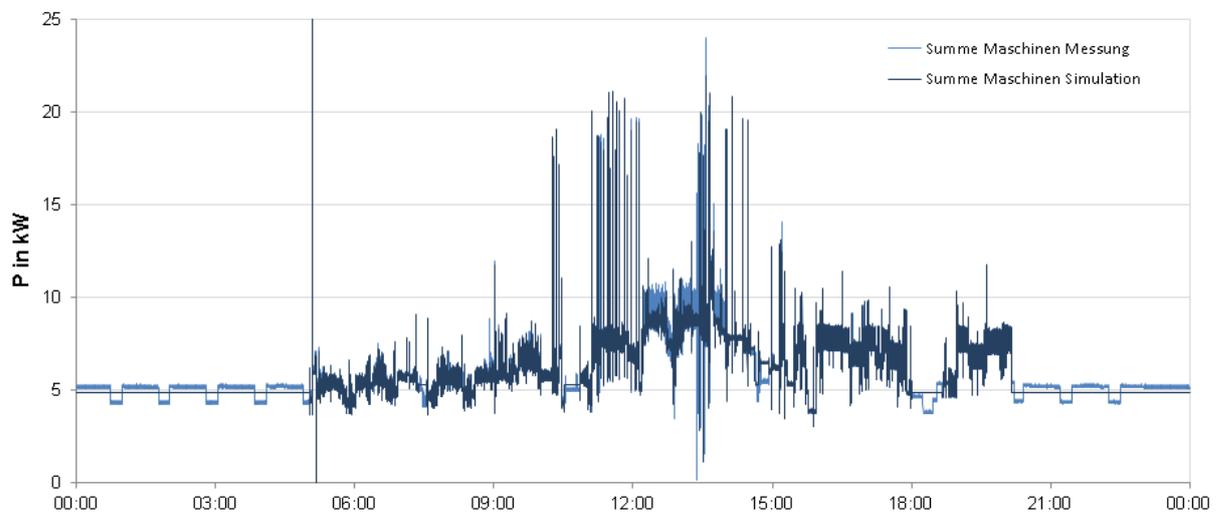
## 5.5 Validierung des Simulationsmodells

Zur Validierung des Simulationsmodells wurde aus den Messungen zwischen dem 8. Jänner 2015 und dem 15. März 2015 ein Tag ausgewählt, an dem alle Maschinen verhältnismäßig viel produziert haben: der 3. Februar 2015. Das Produktionsszenario dieses Tages wurde simuliert, die Ergebnisse mit den Messungen aus dem realen System verglichen und die Abweichungen berechnet. In Tabelle 7 sind die aufgenommenen Bearbeitungs- und Rüstzeiten für die produzierten Teile zusammengefasst, welche als Eingabeparameter für die Simulation dienten. Im Anhang ab Seite 109 sind die Lastgänge der einzelnen Maschinen ersichtlich. Vergleiche wurden sowohl auf Maschinen- als auch auf Gesamthallen-Ebene gezogen, wobei sowohl die elektrischen als auch die pneumatischen Verbräuche berücksichtigt wurden.

Tabelle 7: Bearbeitungs- und Rüstzeiten der am 03. Februar 2015 in der mi-factory produzierten Teile

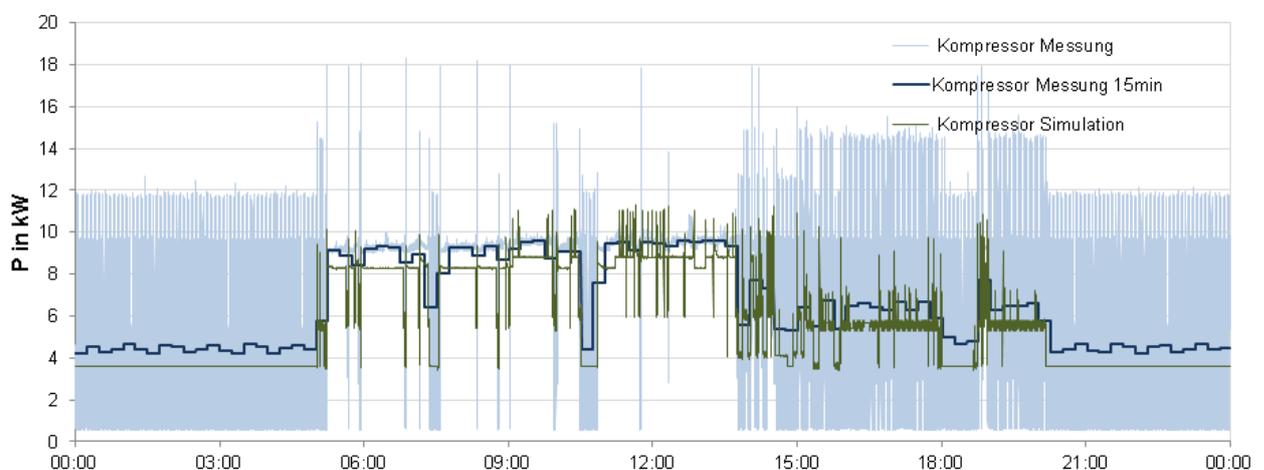
EMCO Maxxturn 45			HERMLE C42U			HAAS VF-2		
Teile - Nr.	Bearbeitungszeit	Rüstzeit	Teile - Nr.	Bearbeitungszeit	Rüstzeit	Teile - Nr.	Bearbeitungszeit	Rüstzeit
2.1	00:03:17	00:38:41	1.1	02:21:08	00:23:17	3.1	00:51:21	00:22:51
2.2	00:03:15	00:04:44	1.2	02:58:41	00:09:18	3.2	00:12:21	00:17:51
2.3	00:02:37	00:23:01	1.3	03:41:29	00:20:07	3.3	01:38:30	00:39:24
2.4	00:11:28	00:02:35	1.4	03:04:25	00:24:07	3.4	01:42:26	00:10:24
			1.5	01:30:04	00:39:18	3.5	00:30:18	00:04:09

Die Gegenüberstellung der realen und simulierten elektrischen Leistungsaufnahme der Maschinen ist in Abbildung 57 dargestellt.



**Abbildung 57: Vergleich der simulierten und realen Lastgänge aller Maschinen (3.2.2015)**

Ebenso wurde der Lastgang für die gemessene elektrische Leistung am Kompressor mit dem simulierten elektrischen Druckluftäquivalent verglichen (siehe Abbildung 58). Aufgrund der hohen Streuung der Messwerte sind im Diagramm zusätzlich deren 15-Minuten-Mittelwerte eingezeichnet.



**Abbildung 58: Vergleich der simulierten mit der realen Leistungskurve für die Kompressorleistung (3.2.2015)**

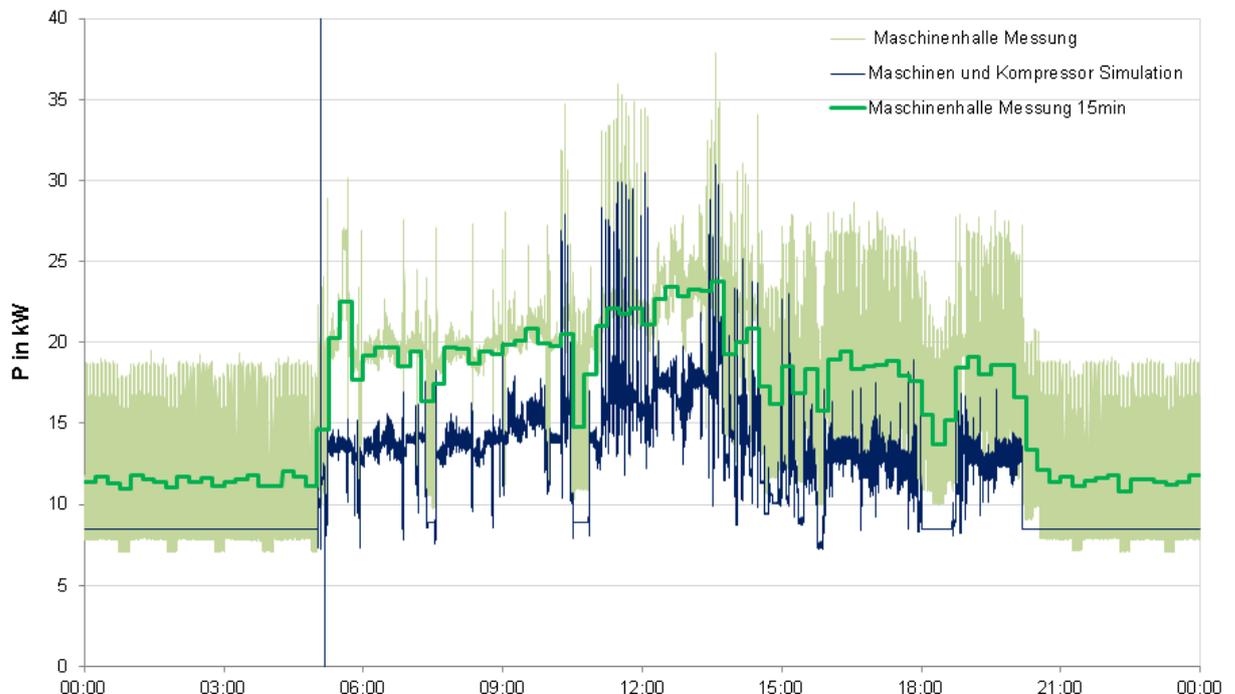
Die gemessenen Gesamttagesenergien wurden mit den Simulationsergebnissen verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 dargestellt. Abweichungen sind beispielsweise auf Leistungsschwankungen bei konstant angenommenen Zuständen zurückzuführen. In Abbildung 57 ist während der arbeitsfreien Zeit das periodisch zugeschaltete Kühlaggregat der HERMLE C42U anhand der Änderungen im Leistungsniveau zu erkennen. Solche periodischen Änderungen führen ebenfalls zu Abweichungen, da nicht vorausgesagt werden kann, welches Leistungsniveau zu einer bestimmten Zeit zum Tragen kommt. Die relativ hohe Abweichung von 14% bei der Simulation des Kompressors ist zusätzlich auf nicht berücksichtigte Faktoren wie

z.B. Leckage-Verluste, Temperaturänderungen und sonstige Verbraucher zurückzuführen.

**Tabelle 8: Abweichungen der Tagesenergieverbräuche der Simulation gegenüber dem realen System (3.2.2015)**

Tagesenergieverbrauch in kWh				
	EMCO Maxxturn 45	HERMLE C42U	HAAS VF-2	Kompressor
Messung	3,8	122,3	11,2	156,3
Simulation	3,9	125,0	11,1	134,5
Differenz	1%	2%	-1%	-14%

Die Summe aller Leistungen der simulierten Ressourcen wurde mit den Messwerten für die gesamte Maschinenhalle verglichen. Die Überlagerung dieser beiden Lastgänge mit dem 15-Minuten-Mittelwert für die Messung sind in Abbildung 59 dargestellt. Dabei ist eine permanente Abweichung zwischen der Messung und der Simulation zu erkennen. Diese kann auf Verbraucher in der Maschinenhalle zurückgeführt werden, die nicht in der Simulation berücksichtigt wurden, wobei hierzu beispielsweise Beleuchtung, EDV und sonstige Geräte zählen.



**Abbildung 59: Vergleich der gemessenen Leistungsaufnahme der gesamten Maschinenhalle mit der Maschinen- und Kompressorsimulation (3.2.2015)**

## 5.6 Simulative Analyse von Alternativ-Szenarien

Das Simulationsprogramm eignet sich zur einfachen Erstellung von Was-Wäre-Wenn-Szenarien, wodurch Optimierungsstrategien untersucht und veranschaulicht werden können. Zur beispielhaften Darstellung dieser Option wurden verschiedene Optimierungspotenziale des betrachteten Simulationstags erhoben. Die dabei gesetzten Handlungen richteten sich vorerst an:

- die Optimierung der Maschinenzustände (bedarfsgerechte Abschaltung)
- die Reduktion des Systemdrucks im Druckluftsystem

Im ersten Schritt wurden die Maschinen in der arbeitsfreien Zeit nach Schichtende vom Zustand „betriebsbereit“ in „aus“ versetzt. Besonders bei der Maschine HERMLE C42U war ein hohes Optimierungspotenzial zu erwarten, da die Maschine nach Schichtende nicht ausgeschaltet wurde.

Im zweiten Schritt wurden Maschinen auch zwischen der Bearbeitung von Teilen fiktiv abgeschaltet, z.B. in Rüstzeiten und in Pausen. Dabei konnte bei der Maschine EMCO Maxxturn 45 ein hohes Optimierungspotenzial erwartet werden, da diese relativ hohe Stillstandszeiten aufwies, in denen die Maschine im Zustand „betriebsbereit“ war.

Zur Optimierung der Druckluftnutzung wurde der Systemdruck in der Simulation um 1 bar gesenkt. Diese Vorgabe wurde hierbei in der Formel zur Berechnung des Druckluftäquivalents integriert und für die Berechnung aller Lastgänge in der Simulation angewendet.

In Abbildung 60 ist der simulierte Lastgang in der Ausgangssituation, in den darauffolgenden Abbildungen sind die optimierten Szenarien ersichtlich. Im Falle der Ausgangssituation ist zu erkennen, dass Maschinen vor und nach der Schicht im Zustand „betriebsbereit“ sind. Dieser Umstand wurde im Szenario zur Betriebszustandsoptimierung in arbeitsfreien Zeiten (Abbildung 61) behoben, indem in arbeitsfreien Zeiten der Zustand „aus“ vorgegeben wurde. Bei der Betriebszustandsoptimierung in arbeitsfreien und Stillstandszeiten (Abbildung 62) wurden die Maschinen zusätzlich zwischen der Fertigung von Bauteilen abgeschaltet.

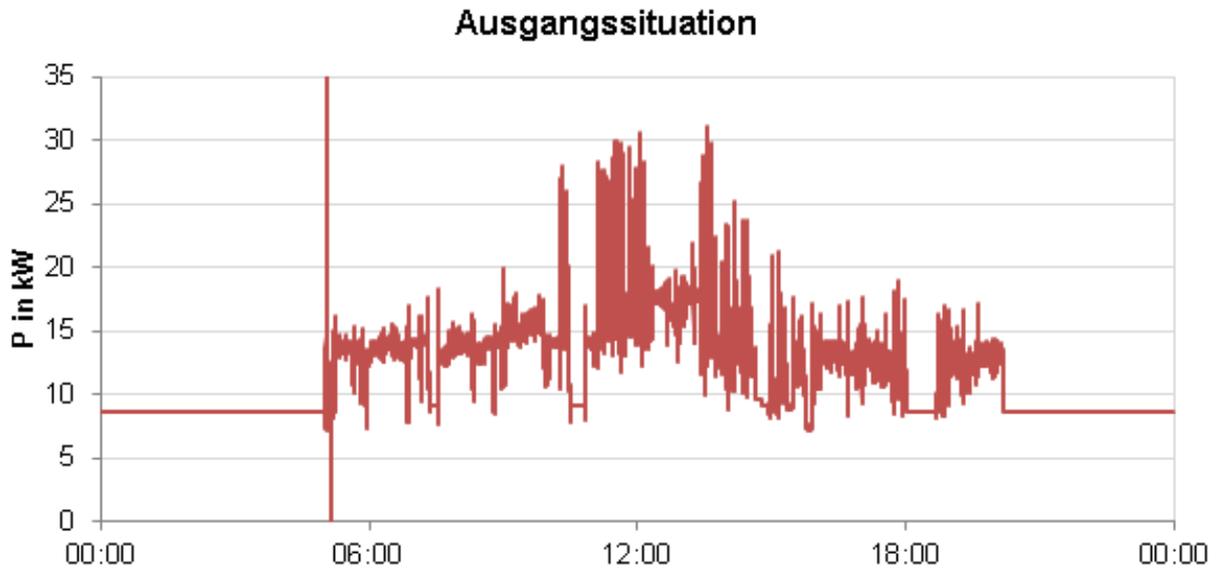


Abbildung 60: Simulierter Lastgang in der Ausgangssituation (3.2.2015)



Abbildung 61: Simulierter Lastgang-Betriebszustandsoptimiert in arbeitsfreien Zeiten

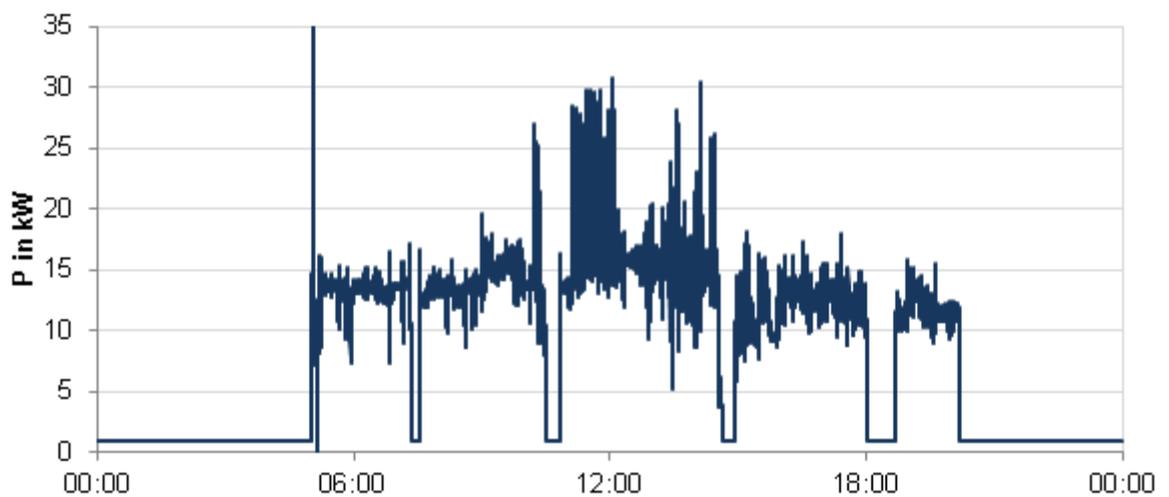


Abbildung 62: Simulierter Lastgang-Betriebszustandsoptimiert in arbeitsfreien Zeiten und im Stillstand



**Abbildung 63: Simulierter Lastgang-Druckabsenkung um 1 bar**

Die Energieoptimierung, welche aus einer Änderung der Druckluftversorgung resultiert (Abbildung 63) bedingt letztlich eine Absenkung des Systemdruckes um ein bar. Zur Bestimmung des Optimierungspotentials wurde die jeweilige Ersparnis im Vergleich zur Ausgangssituation berechnet. Die hierbei errechneten Daten in Bezug auf den Tagesenergieverbrauch sind in Tabelle 9 ersichtlich.

**Tabelle 9: Optimierungspotenzial der energetisch optimierten Szenarien**

	Tagesenergieverbrauch in kWh			
	EMCO Maxxturn 45	HAAS VF-2	HERMLE C42U	Kompressor
<b>Ausgangssituation</b>	3,9	10,5	126,7	134,3
Abschaltung in arbeitsfreier Zeit	2,3	9,1	90,3	100,1
<b>Ersparnis</b>	<b>42%</b>	<b>13%</b>	<b>29%</b>	<b>25%</b>
Abschaltung in Stillstandszeiten	1,2	8,6	83,9	94,5
<b>Ersparnis</b>	<b>68%</b>	<b>18%</b>	<b>34%</b>	<b>30%</b>
Druckabsenkung um 1 bar	3,9	10,5	126,7	123,2
<b>Ersparnis</b>	-	-	-	<b>8%</b>

## 5.7 Durchführung der Simulationsexperimente

In diesem Kapitel wird die Verwendung des Experimentenverwalters in Plant Simulation anhand verschiedener Experimente zur Bestimmung des Einflusses vordefinierter Faktoren auf das energetische Verhalten gezeigt. Wie in Abbildung 64 ersichtlich, sind die untersuchten Einflussfaktoren:

- die Rüstzeit
- die Werkstückwechselzeit
- die Bearbeitungszeit
- die Losgröße

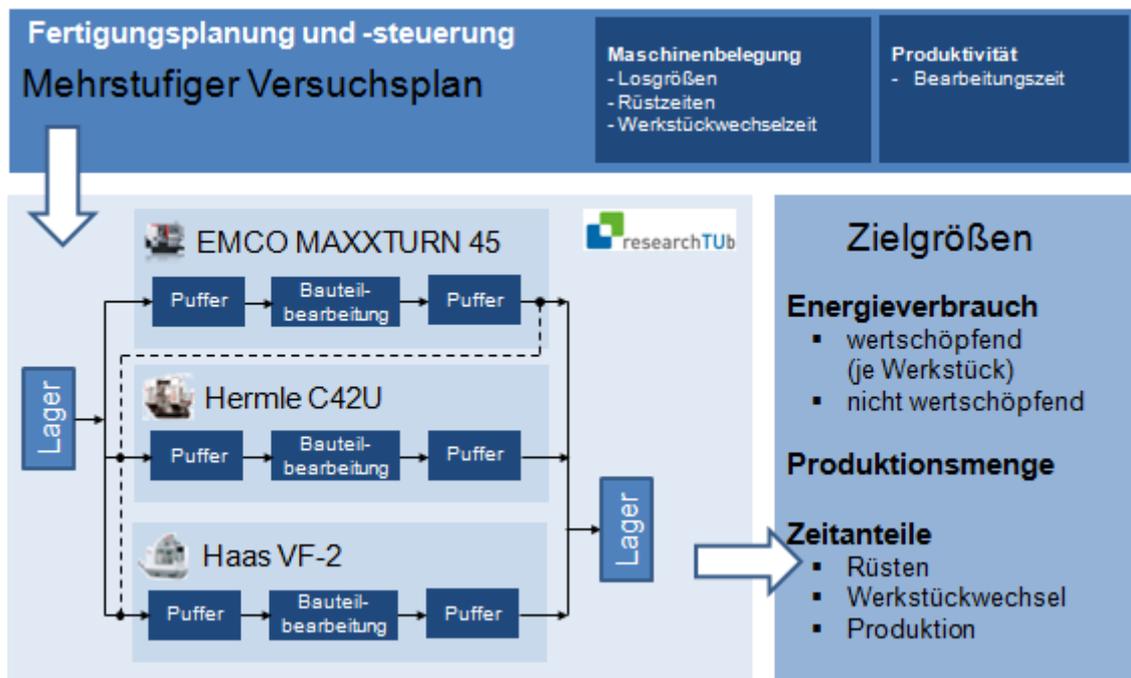


Abbildung 64: Ablauf der Experimente

Zur Generierung der Experimente wurde mittels des Experimentenverwalters ein mehrstufiger Versuchsplan erstellt. Dieser generiert Werte für die oben genannten Faktoren in einem vom Benutzer bestimmten Bereich und Abstufung. Diese leitet er an das Simulationsprogramm weiter. Die Simulation wird mit diesen Attributen durchgeführt und die Ergebnisse werden in einem Bericht abgespeichert. Danach startet der Experimentenverwalter die Simulation mit den nächsten Werten aus dem Versuchsplan. So kann automatisch die Datengrundlage für die Bestimmung des Einflusses von bestimmten Eingangsvariablen auf die vordefinierten Zielgrößen geschaffen werden, indem alle Eingangsvariablen gegeneinander variiert und überprüft werden.

Die gewählten Zielgrößen sind dabei:

- Energieverbrauch je produziertem Stück
- Produktionsmenge gesamt und je Teil
- Zeitanteil je Betriebszustand und je Maschine

Die Energie-pro-Stück-Werte wurden dabei für jedes einzelne Bauteil und für jede Maschine gesamt aufgenommen. Bei den Energie-pro-Stück-Werten der Bauteile wurde zusätzlich zwischen dem Energieverbrauch während der Bearbeitung und während des Rüstvorganges unterschieden. Diese Werte berechnen sich wie folgt:

$$Energie\ pro\ Stück_{\text{Bearbeitung},\ Teil\ i} = \frac{Energie_{\text{Bearbeitung},\ Teil\ i}}{Anzahl_{\text{Teil}\ i}} \quad (17)$$

$$Energie\ pro\ Stück_{\text{Rüstvorgang},\ Teil\ i} = \frac{Energie_{\text{Rüstvorgang},\ Teil\ i}}{Anzahl_{\text{Teil}\ i}} \quad (18)$$

### 5.7.1 Ausgangssituation der Simulationsexperimente

Zur Bestimmung des Einflusses der oben genannten Faktoren ist es vorteilhaft, eine Produktion zu betrachten, welche in höherer Stückzahl und in größeren Losgrößen fertigt. Da in der mi-factory im betrachteten Zeitraum hauptsächlich die Fertigung von Prototypen und Einzelteilen erfolgte, wurde ein fiktives Produktionsszenario generiert. Zur Verwendung kamen dabei Daten von Bauteilen, deren Produktion innerhalb eines längeren Zeitraumes stattfand. Die Eckdaten dieser Bauteile sind im Kapitel 5.3 (Abbildung 50) zusammengefasst. Die Lastgänge dieser Teile wurden nach bestimmten Kriterien zu einem fiktiven Tageslastgang zusammengestellt. Besonderes Bestreben lag darauf, dass den Realitätsbezug trotz höherer Produktionsmenge und Losgröße zu erhalten. Die zusammengesetzten Tageslastgänge der einzelnen Maschinen sind schematisch in Abbildung 65 dargestellt, die Lastgänge der einzelnen Bauteile sind im Anhang ab Seite 109 ausgewiesen.

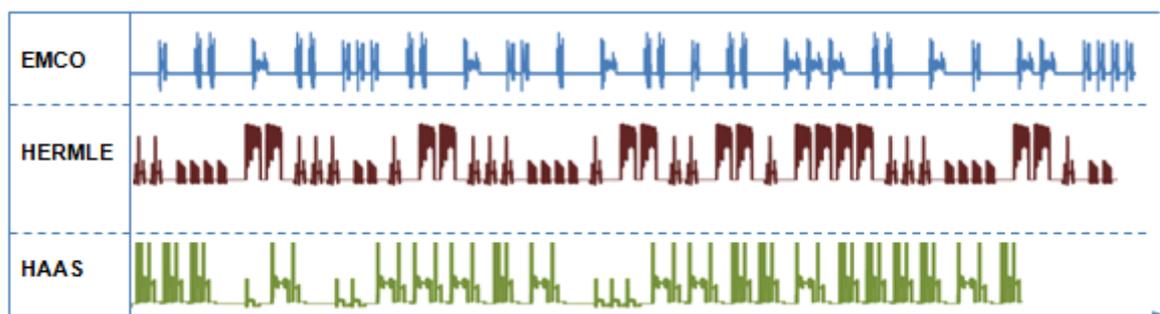


Abbildung 65: Tageslastgänge der einzelnen Maschinen in der Ausgangslage der Experimente

In der schematischen Darstellung der Lastgänge sind die Losgrößen erkennbar. Zur übersichtlicheren Darstellung ist in Abbildung 66 die zeitliche Abfolge der Produktion in der Ausgangssituation in einem Gantt-Diagramm dargestellt. Die Tabelle mit den genauen Werten dieser Zeitpunkte ist für alle Maschinen im Anhang (ab Seite 113) zu finden.

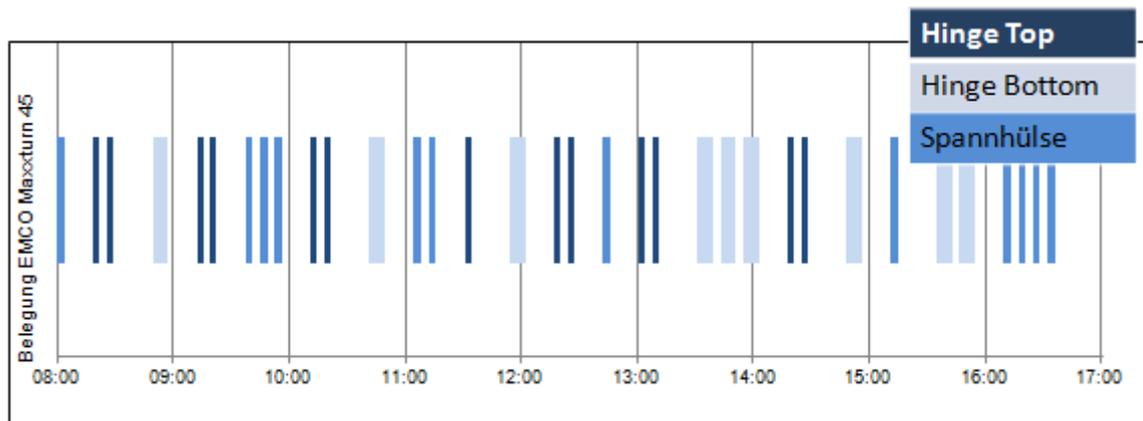


Abbildung 66: Gantt-Diagramm der produzierten Bauteile auf EMCO Maxxturm 45

### 5.7.2 Bestimmung der Einflussfaktoren für das Experiment

Um den Einfluss der Variation von Rüst- und Werkstückwechselzeit zu bestimmen, wurden die Faktoren  $k_R$  und  $k_{WW}$  eingeführt, welche im Experiment mit den Rüstzeiten  $t_{R,i}$  und Werkstückwechselzeiten  $t_{WW,i}$  der jeweiligen Bauteile aus dem Ausgangsszenario multipliziert werden:

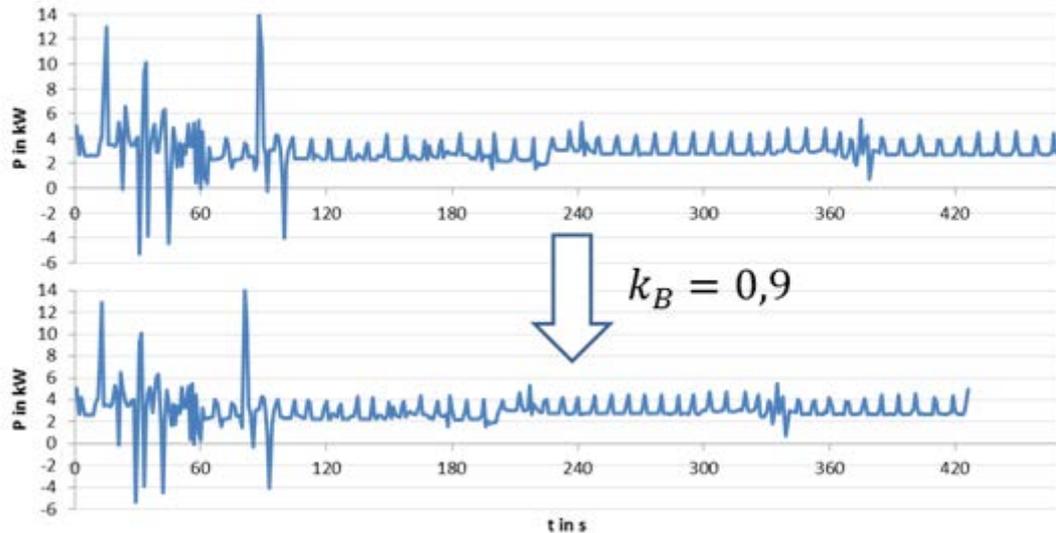
$$t_{R,Sim,i} = t_{R,i} k_R \quad (19)$$

$$t_{WW,Sim,i} = t_{WW,i} k_{WW} \quad (20)$$

Für den Einfluss der Bearbeitungszeit  $t_{B,i}$  müssen die Lastgänge im Vorfeld manipuliert werden. Die Bearbeitungszeit kann durch eine Erhöhung der Produktivität, also beispielsweise eine Verringerung der Nebenzeit im Prozess durch eine optimierte NC-Programmierung, herabgesetzt werden. Für den neuen Lastgang wurden Nebenzeiten und die zugehörigen Leistungsdaten aus den Lastgängen ausgefiltert, bis die gewünschte Bearbeitungszeit von

$$t_{B,Sim,i} = t_{B,i} k_B \quad (21)$$

erreicht war. In Abbildung 67 ist ein Beispiel für eine fiktive Verringerung der Bearbeitungszeit eines Bauteiles um 10% ( $k_B = 0,9$ ), welche durch die Reduktion von Nebenzeiten im Bearbeitungsprozess erreicht wurde, dargestellt.



**Abbildung 67: Manipulation eines Bauteil-Lastganges zur fiktiven Reduktion der Bearbeitungszeit**

Bei der Losgröße wurde in den Experimenten der Absolutwert variiert. In Tabelle 10 sind die hierbei verwendeten Werte der oberen und unteren Stufen sowie die Schrittweite des mehrstufigen Experiments dargestellt. Die dabei verwendeten Grenzwerte sollen die in der Praxis erreichbaren Optimierungspotenziale abdecken. Mit diesen Grenzen und Schrittweiten ergeben sich also  $10 * 10 * 10 * 3 = 3000$  Simulationdurchläufe für das vollfaktorielle Experiment.

**Tabelle 10: Eingabewerte für das mehrstufige Simulationsexperiment**

	Werkstück wechselzeit	Rüstzeit	Los- größe	Produktivität
Untere Stufe	50%	50%	1	80%
Obere Stufe	140%	140%	10	100%
Schrittweite	10%	10%	1	10%

### 5.7.3 Bestimmung der maximalen Losgröße

Für die Durchführung des Experiments wurde im Vorfeld für jede Maschine die maximale Losgröße bestimmt, bei der alle zu fertigenden Bauteile in einem betrachteten Zeitraum zumindest einmal gefertigt wurden.

Die Identifizierung erfolgte über ein Experiment, bei dem die Losgröße, welche für alle Produkte gleich angenommen wurde, eine stetige Erhöhung um ein Teil erfuhr. Nach der Fertigung je eines Loses aller Produkte wurde die Simulation beendet und die benötigte Zeit aufgenommen.

Der Betrachtungszeitraum für die Experimente war mit 12 Stunden festgelegt. Tabelle 11 zeigt die maximale Losgröße, die pro Maschine in dieser Zeit gefertigt werden kann.

**Tabelle 11: Bestimmung der maximalen Losgröße**

	Losgröße	Fertigungszeit
EMCO	11	11:04:50
HAAS	10	11:07:49
HERMLE	17	11:52:19

## 6 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Simulationsexperimente präsentiert, welche auf Datenbasis der systematischen Untersuchung mit Hilfe des Plant Simulation-Experimentenverwalters entstanden sind. Dabei wurden die Eingabegrößen (Produktivität, Losgröße, Rüst- und Werkstückwechselzeit) zwischen zwei Grenzen mit einer einstellbaren Schrittgröße geändert und alle Kombinationen dieser Parametersätze erzeugt, simuliert und die Zielgrößen (Energie-pro-Stück für die Bauteile in verschiedenen Betriebszuständen) ausgegeben.

Auf diese Weise können die Einflüsse der Eingabegrößen auf Maschinen- und Bauteilebene dargestellt werden. Zudem ist ein Vergleich der Maschinen untereinander möglich. In Abbildung 68 ist beispielhaft die grafische Auswertung der berechneten Energie-pro-Stück für die Maschinen der mi-factory dargestellt. In den folgenden Kapiteln werden einfachere Darstellungen verwendet, um eine übersichtliche Darstellungsform für die Diskussion des Einflusses der verschiedenen Faktoren auf die Ergebnisse für einzelne Bauteile bzw. Maschinen bereitzustellen.

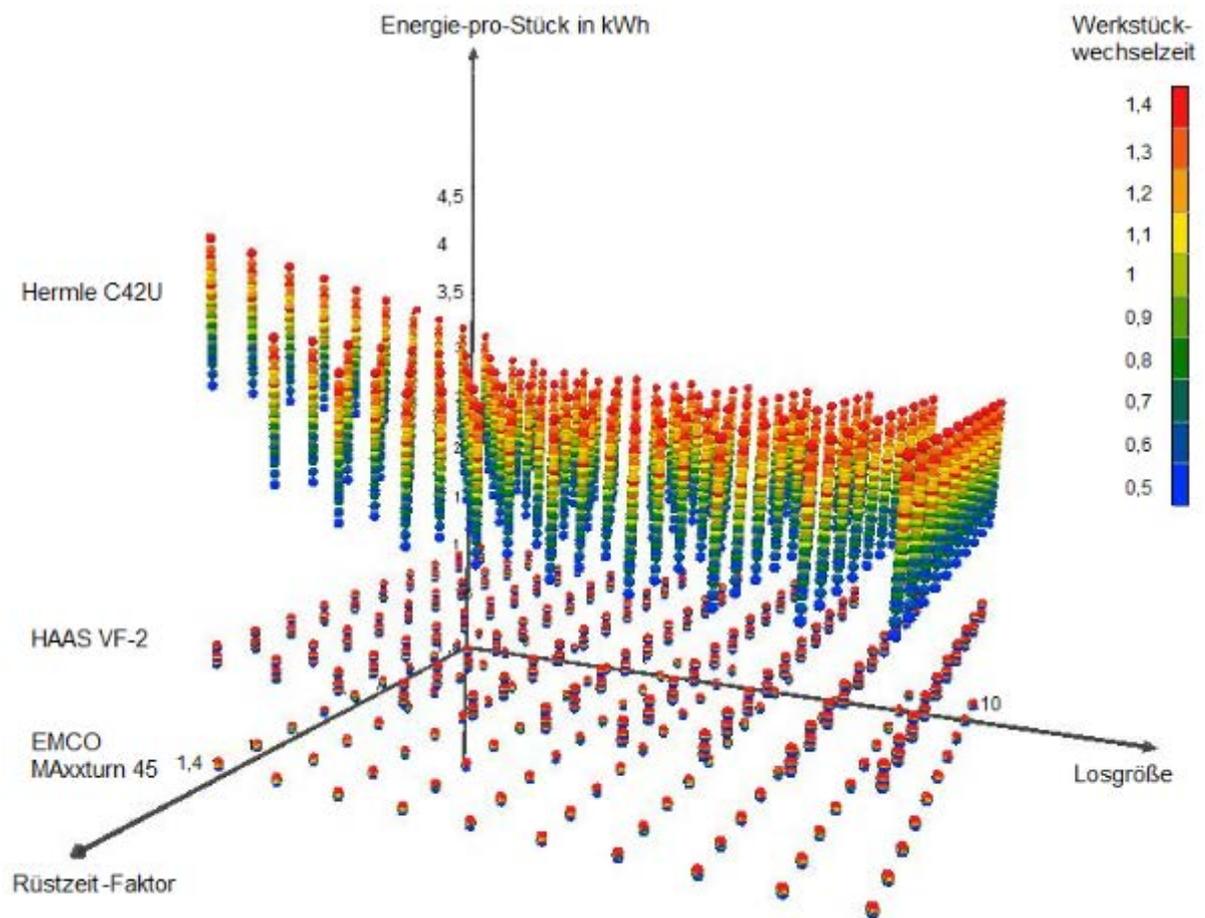


Abbildung 68: Darstellung des Einflusses der Eingabegrößen auf die Energie-pro-Stück der Maschinen in der mi-factory

### 6.1.1 Auswertung auf Bauteilebene

In diesem Kapitel wird die Auswertung der Bauteile, welche auf dem Bearbeitungszentrum HERMLE C42U gefertigt wurden, präsentiert. Die Kerndaten dieser Bauteile sind in Tabelle 12 zusammengefasst. Außerdem ist die durchschnittliche Leistungsaufnahme der jeweiligen Bauteile während der Bauteilbearbeitung angeführt.

**Tabelle 12: Kerndaten der Bauteile auf HERMLE C42U**

	Teil 1	Teil 2	Teil 3
Bearbeitungszeit	573 s	411 s	790 s
Rüstzeit	400 s	558 s	750 s
Werkstückwechselzeit	323 s	323 s	323 s
Durchschnittliche Leistungsaufnahme	10,33 kW	12,69 kW	12,83 kW

Dabei ist zu erkennen, dass Teil 3 in Relation zu den anderen Bauteilen eine lange Bearbeitungs- und Rüstzeit bei gleichzeitig hoher durchschnittlicher Leistungsaufnahme aufweist. Dies macht sich in Abbildung 69, in der die Ergebnisse für die betrachteten Bauteile verglichen werden, mit einem relativ hohen Wert für Energie-pro-Stück für diesen Bauteil bemerkbar. In den Diagrammen sind die im Experiment definierten oberen und unteren Grenzen als Kurven eingezeichnet. Hier können ausgehend vom Anfangswert (Rüstzeit 100%, Werkzeugwechselzeit 100%, Losgröße 1 und Bearbeitungszeit 100%) die Optimierungspotenziale bei einer Verbesserung der jeweiligen Einflussfaktoren auf die Energie-pro-Stück abgelesen werden.

Es lassen sich grundsätzliche Erkenntnisse ableiten. Beispielsweise ist eine Optimierung der Rüstzeit bei einer kleinen Losgröße am effektivsten. Zudem ist die Erhöhung der Losgröße von 1 auf 2 Stück auf die Energie-pro-Stück gleichbedeutend mit einer Verringerung der Rüstzeit um 50%. Diese Thematik wird in den folgenden Kapiteln genauer behandelt. Weitere Eigenschaften können beim Vergleich von zwei Bauteilen abgeleitet werden. Vergleicht man Teil 1 mit Teil 2, fällt auf, dass eine Verringerung der Rüstzeit im gleichen Maße bei Teil 2 effektiver ist. Dies ist damit erklärt, dass Teil 2 bei gleicher Grundlast eine höhere Rüstzeit aufweist. Eine Verringerung der Bearbeitungszeit wirkt sich stärker auf Teil 1 aus. Dies ist interessant, da trotz der höheren mittleren Leistungsaufnahme während der Bearbeitung von Teil 2 die längere Bearbeitungszeit von Teil 1 den höheren Einfluss auf den Energieverbrauch hat.

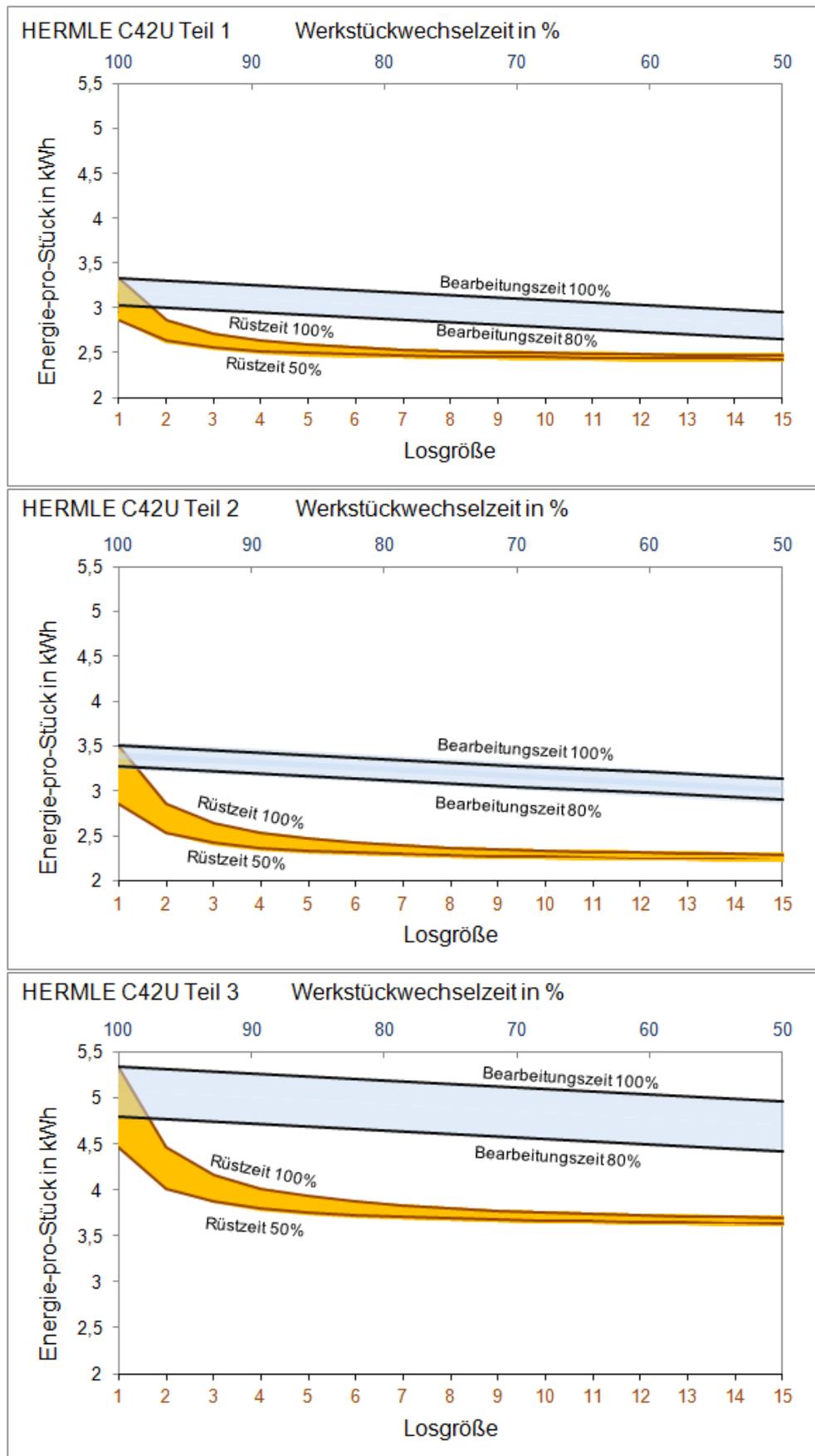


Abbildung 69: Einfluss der Eingangsfaktoren auf ihre Energie-pro-Stück der auf der HERMLE C42U gefertigten Bauteile

## 6.1.2 Auswertung auf Maschinenebene

Zur Auswertung auf Maschinenebene werden als Zielgrößen die Mittelwerte der Energie-pro-Stück der auf den jeweiligen Maschinen produzierten Bauteile herangezogen. In Abbildung 70 ist zu erkennen, in welchen Bereichen sich diese Ergebnisse bewegen.

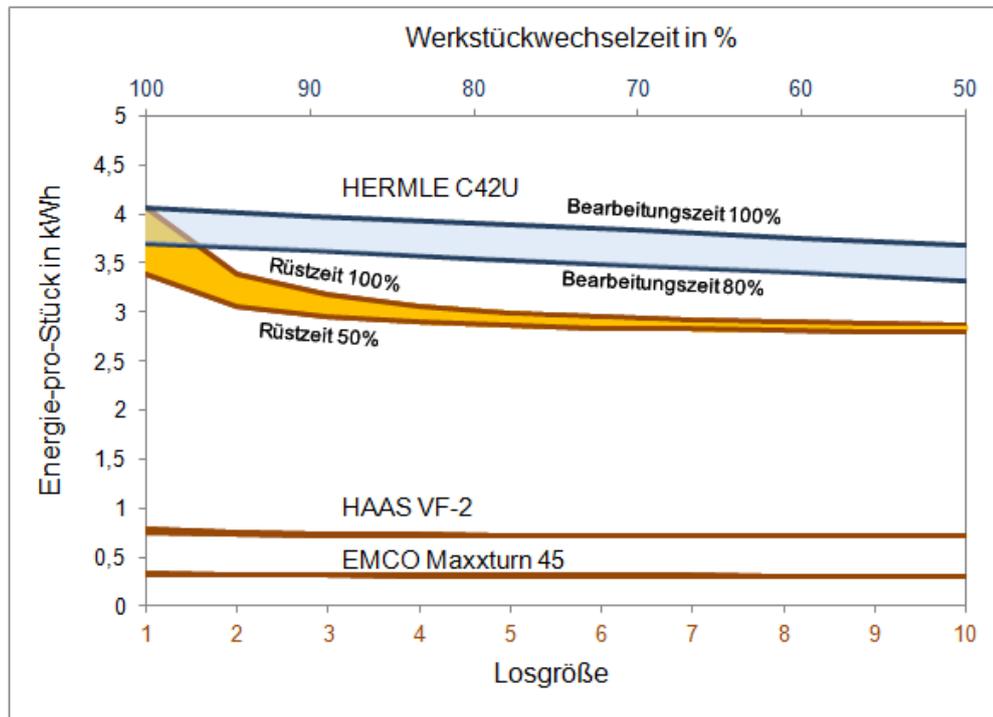


Abbildung 70: Einfluss der Rüst-, Werkstückwechsel-, Bearbeitungszeit und Losgröße auf die Energie-pro-Stück der Maschinen der mi-factory

Es ist zu erkennen, dass der mittlere Wert für die Energie-pro-Stück des Bearbeitungszentrums HERMLE C42U mit Abstand am höchsten ist. Dies hängt vor allem mit der hohen Grundlast dieser Maschine zusammen, aber auch mit der hohen Leistungsaufnahme während der Bauteilbearbeitung. In Tabelle 13 sind die Grundlasten der Maschinen, die mittleren Leistungsaufnahmen bei der Bauteilbearbeitung und weitere Eckdaten der Bauteile zusammengefasst.

Tabelle 13: Wichtige Eckdaten der Maschinen

	HERMLE C42U	EMCO Maxxturn 45	HAAS VF-2
Grundlast	4,86 kW	0,184 kW	0,44 kW
Mittlere Leistungsaufnahme - Bearbeitung	11,95 kW	3,72 kW	2,29 kW
Mittlere Bearbeitungszeit	591 s	294 s	1041 s
Mittlere Rüstzeit	569 s	777 s	659 s

In Abbildung 71 sind die Auswirkungen der Einflussfaktoren auf die Energie-pro-Stück der drei Maschinen dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass sich die Hypothesen aus den vorangegangenen Bauteilvergleichen auch auf die gemeinsame Betrachtung aller Maschinen übertragen lassen. An der Konvergenz der Grenzkurven für die Rüstzeit mit zunehmender Losgröße ist zu erkennen, dass eine Verkürzung der Rüstzeit bei kleiner Losgröße stärkere Auswirkung auf den Energieverbrauch hat als bei einer entsprechend hohen Losgröße. Zudem kann man die Erhöhung der Losgröße und die Verkürzung der Rüstzeit in ein Verhältnis bringen. Um denselben Energie-pro-Stück-Wert infolge einer Erhöhung der Losgröße zu erhalten, muss die Rüstzeit nach folgendem Gesetz verringert werden:

$$\text{Verringerung der Rüstzeit in \%} \hat{=} \left(1 - \frac{1}{\text{Losgröße}}\right) * 100$$

Erhöht man die Losgröße von 1 auf 2 ist die Auswirkung auf die Energie-pro-Stück gleichzusetzen mit einer Reduktion der Rüstzeit um 50%, bei einer Änderung der Losgröße von 1 auf 3 müsste die Rüstzeit um 66,7% reduziert werden und so weiter.

Beim Vergleich der Maschinen untereinander erkennt man einen großen Unterschied bei den Grenzkurven für die Bearbeitungszeiten. Diese liegen bei den Maschinen HAAS VF-2 bzw. EMCO Maxxturn 45 im Verhältnis zu den Grenzkurven der Rüstzeiten weiter auseinander als beim Bearbeitungszentrum HERMLE C42U. Dies ist zurückzuführen auf das Verhältnis der Grundlast zur mittleren Leistungsaufnahme während einer Bearbeitung.

**Tabelle 14: Leistungs- und Zeitverhältnis vom Bearbeitungs- zum Rüstvorgang der Maschinen**

	HERMLE C42U	EMCO Maxxturn 45	HAAS VF-2
Leistung Bearbeitung/ Grundlast	2,45	20,21	5,20
Bearbeitungszeit/ Rüstzeit	1,03	0,37	1,58

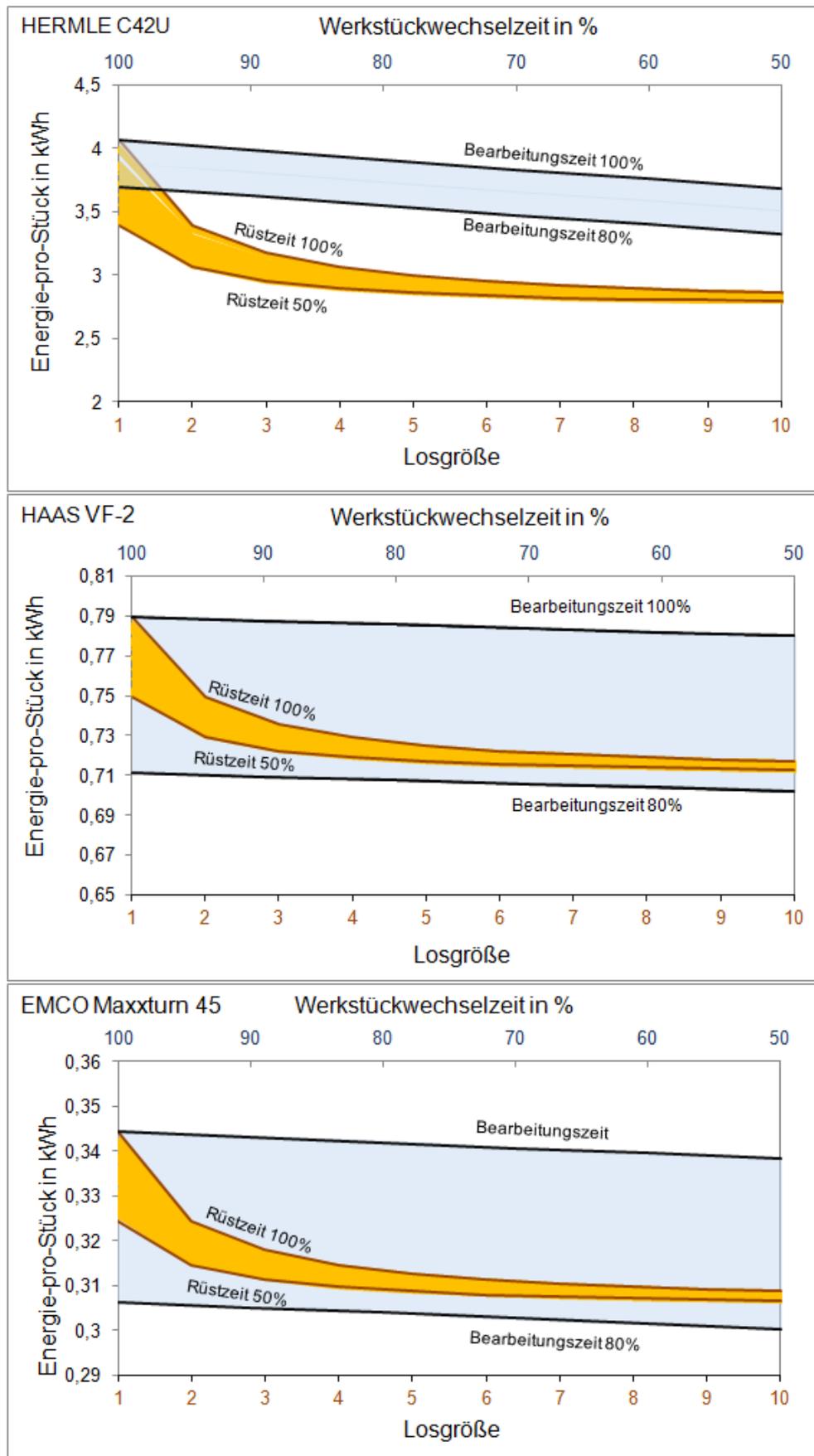


Abbildung 71: Auswirkung der Eingangsfaktoren auf die mittlere Energie-pro-Stück (HERMLE C42U, HAAS VF-2, EMCO Maxxturm 45)

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die um die Energiedaten erweiterte Materialflusssimulation stellt ein wichtiges Werkzeug zur Energieflussvisualisierung, Energieplanung und zur Überprüfung des Potenzials von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz eines Produktionssystems dar. Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Konzept führt die Daten aus einem Energiemonitoringsystem in ein ereignisorientiertes Simulationsmodell über.

Um den zeitlichen Verlauf der Betriebszustände von Maschinen darstellen zu können, wurden in der SCADA-Software WinCC OA verschiedene Methoden implementiert. Dabei wurden entweder Signale aus der Maschinensteuerung ausgelesen und verarbeitet oder Daten aus energetischen Messungen so interpretiert, dass mit ihrer Hilfe Aussagen über den Betriebszustand getätigt werden konnten. Die daraus entstehenden Nutzungsprofile der Maschinen dienen zusammen mit den elektrischen und pneumatischen Lastgängen der produzierten Bauteile und den im Vorfeld untersuchten Leistungsniveaus der Maschinen in ihren verschiedenen Betriebszuständen als Inputdaten für die Simulation. Für die Ausgabe der Betriebsdaten wurde eine Oberfläche in WinCC OA programmiert, welche die relevanten Daten in einer für die Simulation nutzbaren Form ausgibt.

Für die mi-factory wurde mit dem Materialfluss-Simulationsprogramm Plant Simulation ein zustandsbasiertes Modell erstellt, welches die Werkzeugmaschinen und den Kompressor abbildet. Dabei wurden den jeweiligen Maschinen in Betriebszuständen, in denen die Leistungsaufnahme als konstant angenommen werden konnte, messtechnisch erfasste Leistungsniveaus hinterlegt. Während der Fertigung wurden die realen Lastgänge der Bauteile für die Simulation des Lastganges der mi-factory herangezogen.

Mit Hilfe des Simulationsmodells wurden Experimente zur Bestimmung der Auswirkungen verschiedener Einflussfaktoren auf die spezifische Bauteilenergie für bestimmte Maschinen und Werkstücke generiert. In den Ergebnissen wurden die Optimierungspotenziale bezüglich Losgröße und Rüstzeit miteinander verglichen. In diesem Zuge konnte die Losgröße als ein entscheidender Einflussfaktor identifiziert werden. Die Fertigung in einer kleinen Losgröße ist hinsichtlich der Energieeffizienz ungünstig und kann nur bei kurzer Rüstzeit und geringer Grundlast als günstig in Betracht gezogen werden.

Nach dem Vergleich der beiden Methoden zur Erfassung der Betriebszustände kann festgehalten werden, dass die Erfassung mittels energetischer Messdaten ungenauer ist. Der Zeitpunkt eines Zustandswechsels ist dabei höchstens um die vordefinierte Überbrückungszeit verschoben. Bei der Erfassung über

Steuerungssignale muss darauf geachtet werden, dass die Signale aus der SPS durchgängig an WinCC OA übermittelt werden. Kurze Unterbrechungen der Signalübertragung beispielsweise durch die Verwendung mehrerer Teilprogramme beim Fertigen eines Werkstücks müssen entweder in der NC-Programmierung berücksichtigt oder durch das Setzen von Merkern behoben werden.

Die Verwendung der Bauteil-Lastgänge in der Simulation bietet neben der besseren Visualisierung zusätzlich die Vorteile, Lastspitzen ermitteln und Leistungsverläufe der einzelnen Bauteile analysieren zu können. Außerdem besteht die Möglichkeit neben den gemessenen Lastgängen aus der Messung auch solche aus dynamischen Modellen für die Simulation heranzuziehen. Für die Durchführung von Experimenten, in denen diese Effekte nicht benötigt werden, ist die Verwendung der mittleren Leistungsaufnahmen der jeweiligen Bauteile vorteilhaft. Dadurch wird die Simulationszeit deutlich verkürzt und die Datenmengen vermindert.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die Möglichkeit zur Weiterentwicklung der vorliegenden Methodik in verschiedene Richtungen besteht. Beispielsweise könnte ein Experiment generiert werden, mit welchem der Einfluss der Grundlast und der Leistungsaufnahme der Bauteile genauer hervorgehoben wird. Dazu könnten zusätzlich zu den bisher verwendeten Einflussfaktoren die Grundlasten der Maschinen und die mittleren Leistungsaufnahmen während der Bauteilbearbeitung in einem sinnvollen Bereich variiert werden.

Weiters könnte eine Verbesserung der Datenübermittlung aus dem Monitoringsystem in das Simulationsprogramm erfolgen, indem die Möglichkeit eines direkten Zugriffs der Simulationssoftware auf die WinCC OA-Datenbank zu untersuchen wäre. Generell ist eine Simulation bzw. eine Berechnung von Modellen mit Hilfe der SCADA-Software denkbar. Durch die Reduzierung der Schnittstellen und des Datenflusses ergebe sich dadurch ein großer Vorteil in der Handhabung der Daten. Außerdem könnten dynamische Prozessmodelle direkt mit Signalen aus der SPS oder Energiemessdaten versorgt werden.

## 8 Anhang

### 8.1 Liste wichtiger SINUMERIK 840D sl-Signale

Bezeichnung	Adresse	Beschreibung
M01 aktiv	.DB21.DBX32.5	Programmierter Halt
M30/M02 aktiv	.DB21.DBX33.5	Ende eines Teileprogramms
M03 aktiv	.DB21.DBB194.3	Spindel im Uhrzeigersinn
M04 aktiv	.DB21.DBB194.4	Spindel im Gegenuhrzeigersinn
M05 aktiv	.DB21.DBB194.5	Spindel Halt
M07 aktiv	.DB21.DBB194.7	Kühlmittel 2 EIN
M08 aktiv	.DB21.DBB195.1	Kühlmittel 1 EIN
M09 aktiv	.DB21.DBB195.2	Kühlmittel 1 und 2 AUS
G-Gruppe 1	.DB21.DBB215	Aktive G-Funktion der Gruppe 1 (Bewegungsbefehle)
G-Gruppe 2 bis n	.DB21.DBB216	bis max. .DB21.DBB271
Auto	.DB11.DBX6.2	Aktive Betriebsart: Automatikbetrieb
JOG	.DB11.DBX6.0	Aktive Betriebsart: Jog-Betrieb
MDA	.DB11.DBX6.1	Aktive Betriebsart: MDA-Betrieb
REF	.DB11 DBX5.0	Referenzpunktfahren innerhalb MDA
REPOS	.DB11 DBX5.1	Repositionieren innerhalb MDA
TeachIn	.DB11 DBX5.2	Ein-Teachen von Achspositionen
Prg. läuft	.DB21.DBX35.0	NC-Programm wird bearbeitet
Prg. angehalten	.DB21.DBX35.2	NC-Programm abgeschlossen oder angehalten
Prg. abgebrochen	.DB21.DBX35.4	NC-Programm abgebrochen
Not-Aus	.DB10.DBX56.1	Not-Aus-Einrichtung aktiviert
Spindel steht	.DB31.DBX61.4	Achse/Spindel steht ( $n < n_{Min}$ )
Motor-Anwahl A	.DB31.DBX21.3	Anwahl des Motors und Betriebsart
Motor-Anwahl B	.DB31.DBX21.4	Betriebsart: 1...Stern, 2...Dreieck
Hochlaufvorgang beendet	.DB31.DBX94.2	Drehzahlwert entspricht Sollwert
Temperatur-Vorwarnung	.DB31.DBX94.1	Die Kühlkörper-Temperatur hat die Warnschwelle überschritten
Temperatur-Vorwarnung	.DB31.DBX94.0	Die Motor-Temperatur hat die Warnschwelle überschritten

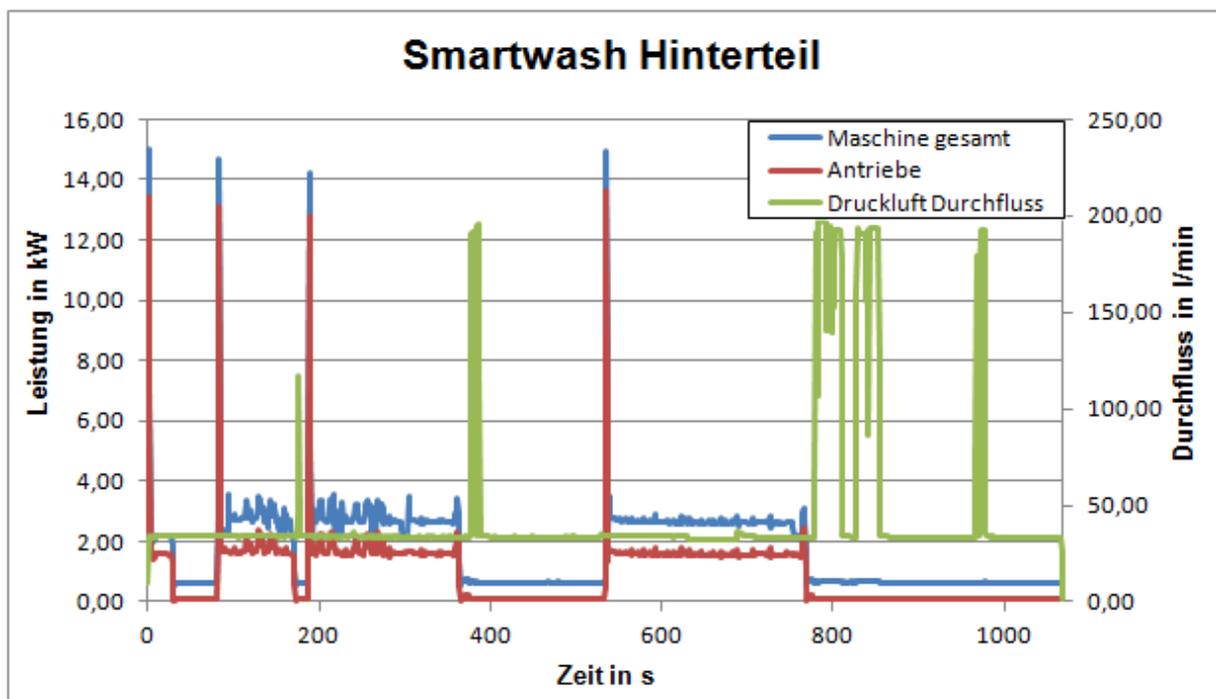
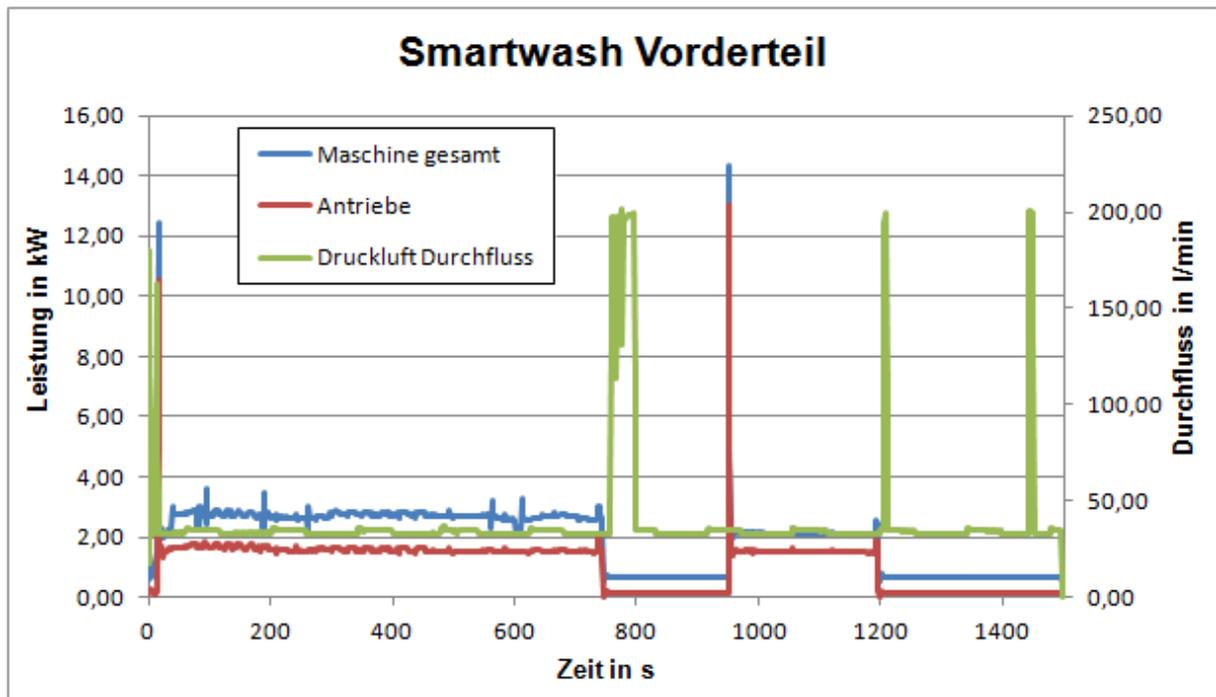
Bezeichnung	Adresse	Beschreibung
NC-Ready	.DB10.DBX108.7	NC ist bereit
NCK-Alarm	.DB10.DBX109.0	NCK-Alarm steht an
NCK-Alarm	.DB21.DBX36.7	NCK-Alarm mit Bearbeitungsstillstand steht an
Werkstück-Soll erreicht	.DB21.DBX317.2	Anzahl der zu fertigenden Werkstücke erreicht
Lageregelung	DB31.DBX60.5	die Lageregelung aktiv

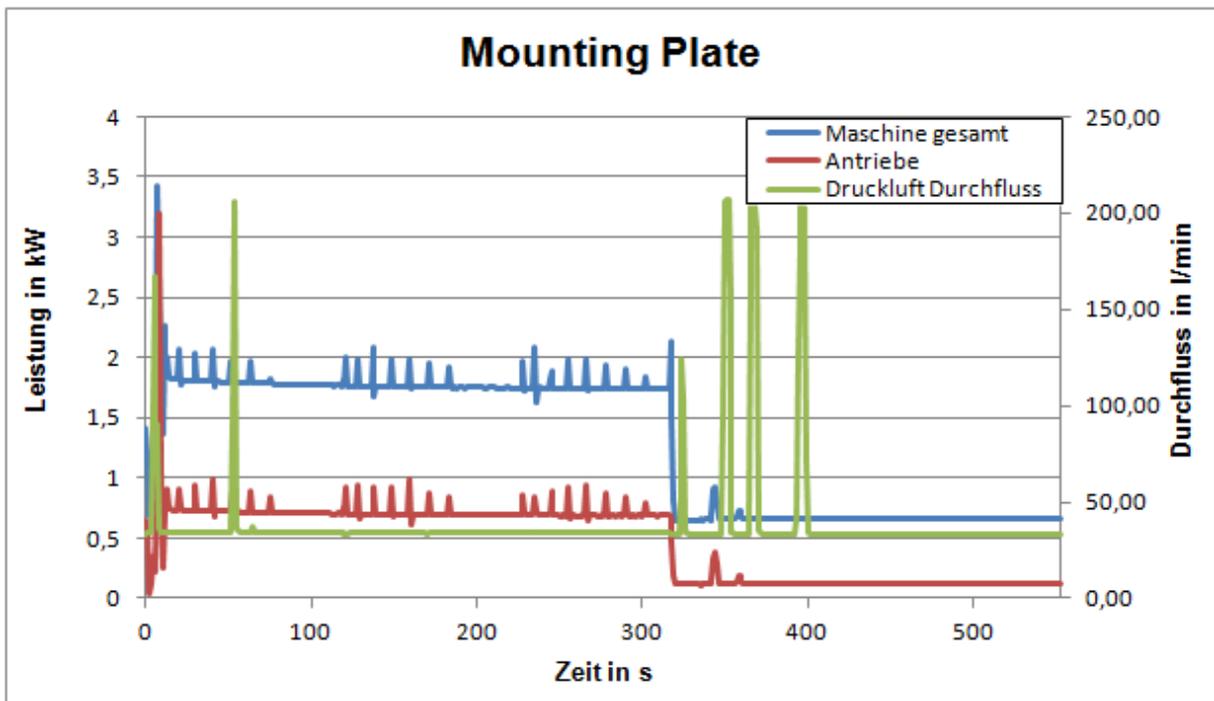
### 8.1.1 Zuordnung Datenbaustein (DB)-Nummern zu Nahtstellen

Zuordnung Nahtstellen-DB	Bedeutung
DB2	Alarmer, Meldungen
DB10	NCK-Signale (NC-Kern)
DB11	BAG-Signale (Betriebsartengruppe)
DB19	HMI-Signale (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
DB21 bis DB30	Kanal-Signale
DB31 bis DB61	Achs/Spindel-Signale
DB71	Werkzeugverwaltung

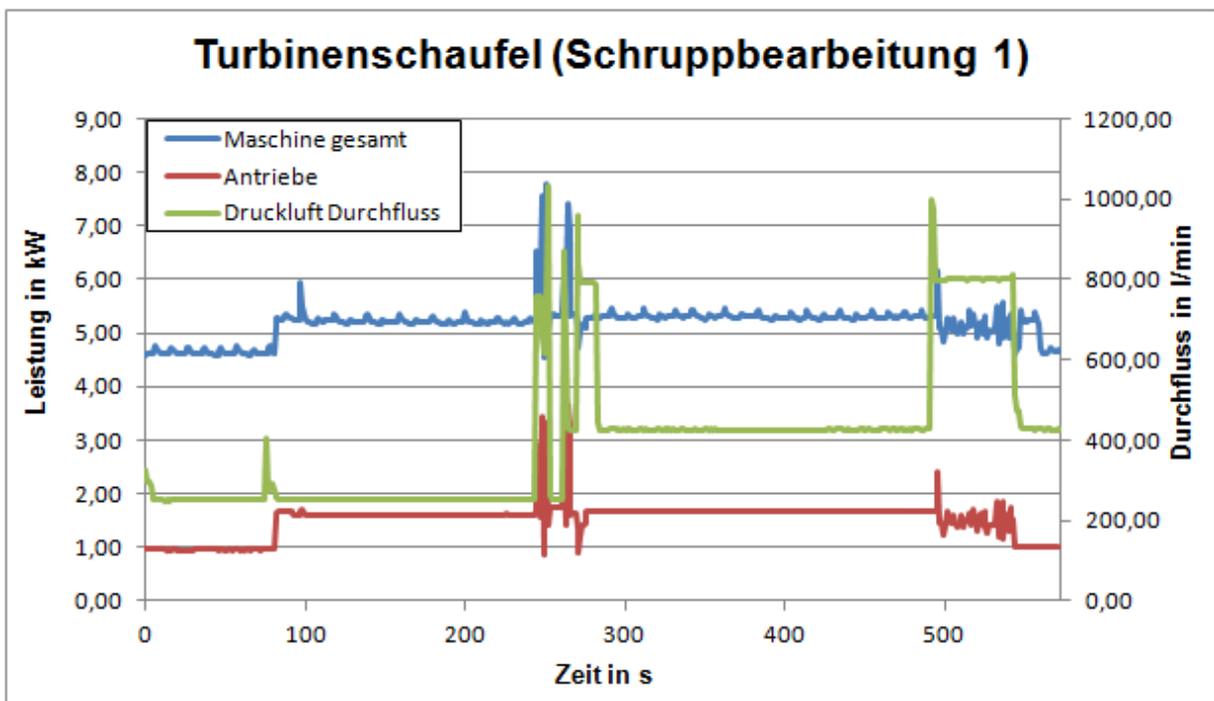
## 8.2 Lastgänge der Bauteile

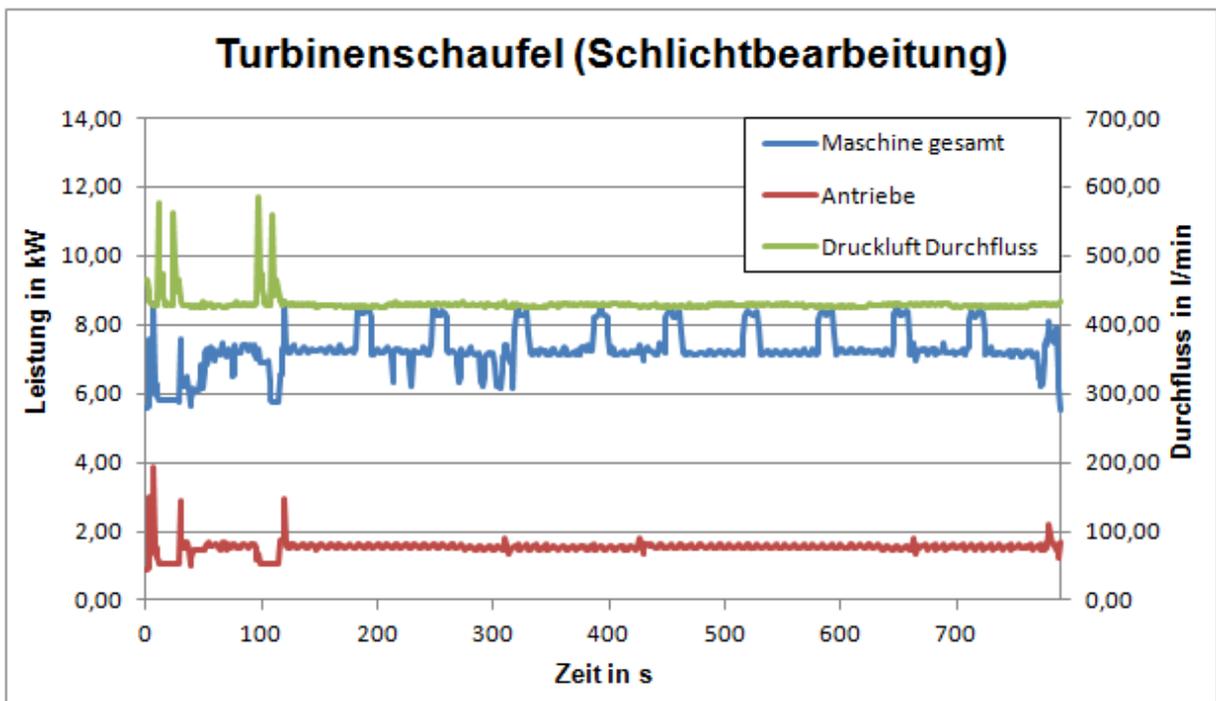
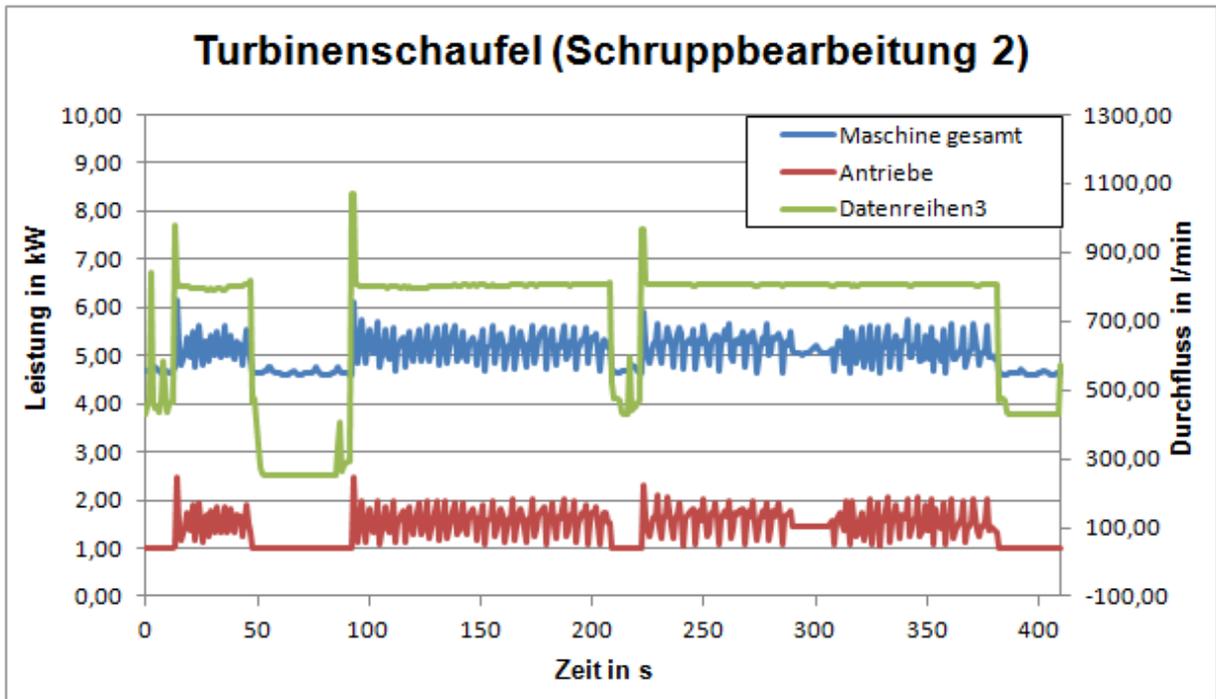
### 8.2.1 HAAS VF-2



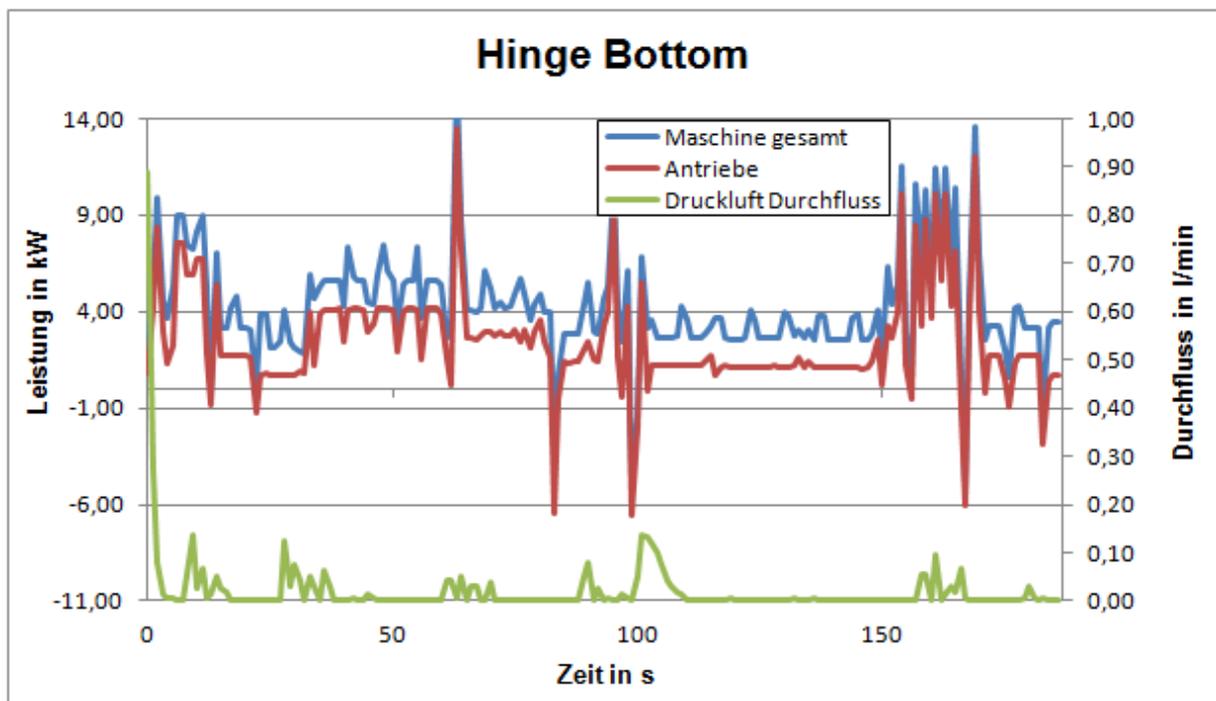
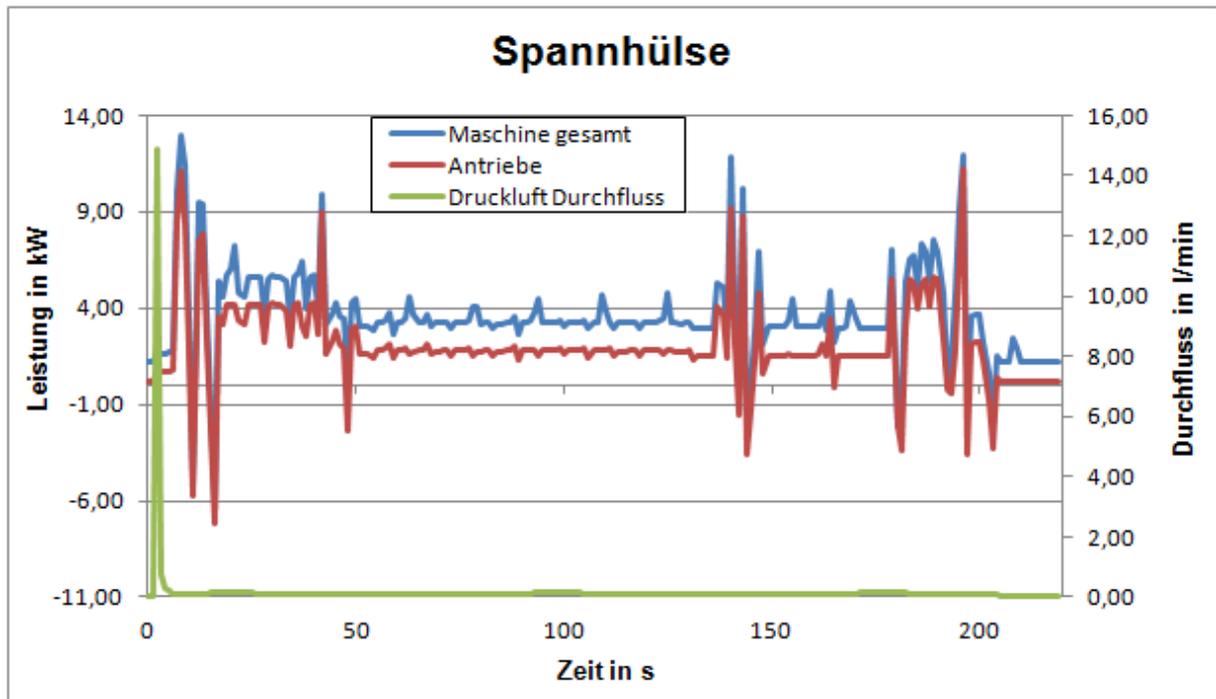


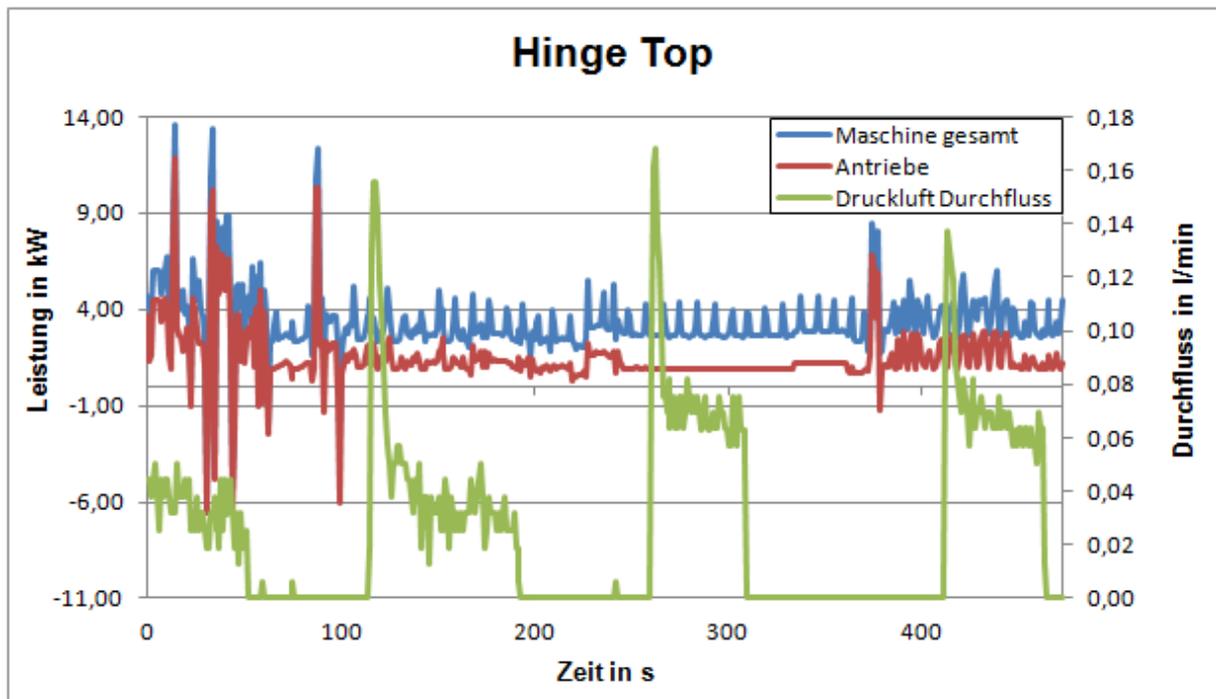
## 8.2.2 HERMLE C42U





## 8.2.3 EMCO Maxxturn 45





## 8.3 Produktionsreihenfolge-Experiment Ausgangslage

### 8.3.1 EMCO Maxxturn 45

Werkstück	Beginn	Fertigstellung	Losgröße	Rüstzeit	Bearbeitungszeit	Werkstückwechselzeit
Spannhülse	07:49:00	08:07:41	1	00:11:10	00:03:40	00:03:51
H. Bottom	08:07:41	08:32:55	2	00:11:18	00:03:07	00:03:51
H. Top	08:32:55	09:01:03	1	00:16:23	00:07:54	00:03:51
H. Bottom	09:01:03	09:26:17	2	00:11:18	00:03:07	00:03:51
Spannhülse	09:26:17	10:00:00	3	00:11:10	00:03:40	00:03:51
H. Bottom	10:00:00	10:25:14	2	00:11:18	00:03:07	00:03:51
H. Top	10:25:14	10:53:22	1	00:16:23	00:07:54	00:03:51
Spannhülse	10:53:22	11:19:34	2	00:11:10	00:03:40	00:03:51
H. Bottom	11:19:34	11:37:50	1	00:11:18	00:03:07	00:03:51
H. Top	11:37:50	12:05:58	1	00:16:23	00:07:54	00:03:51
H. Bottom	12:05:58	12:31:12	2	00:11:18	00:03:07	00:03:51
Spannhülse	12:31:12	12:49:53	1	00:11:10	00:03:40	00:03:51
H. Bottom	12:49:53	13:15:07	2	00:11:18	00:03:07	00:03:51
H. Top	13:15:07	14:06:45	3	00:16:23	00:07:54	00:03:51
H. Bottom	14:06:45	14:31:59	2	00:11:18	00:03:07	00:03:51
H. Top	14:31:59	15:00:07	1	00:16:23	00:07:54	00:03:51
Spannhülse	15:00:07	15:18:48	1	00:11:10	00:03:40	00:03:51
H. Top	15:18:48	15:58:41	2	00:16:23	00:07:54	00:03:51
Spannhülse	15:58:41	16:39:55	4	00:11:10	00:03:40	00:03:51

### 8.3.2 HERMLE C42U

Werkstück	Beginn	Fertigstellung	Losgröße	Rüstzeit	Bearbeitungszeit	Werkstückwechselzeit
Schaufel 1	05:01:00	05:37:32	2	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 2	05:37:32	06:35:46	4	00:09:18	00:06:51	00:05:23
Schaufel 3	06:35:46	07:25:22	2	00:12:30	00:13:10	00:05:23
Schaufel 1	07:25:22	08:16:50	3	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 2	08:16:50	08:50:36	2	00:09:18	00:06:51	00:05:23
Schaufel 1	08:50:36	09:12:12	1	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 3	09:12:12	10:01:48	2	00:12:30	00:13:10	00:05:23
Schaufel 1	10:01:48	10:53:16	3	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 2	10:53:16	11:51:30	4	00:09:18	00:06:51	00:05:23
Schaufel 1	11:51:30	12:13:06	1	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 3	12:13:06	13:02:42	2	00:12:30	00:13:10	00:05:23
Schaufel 1	13:02:42	13:39:14	2	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 3	13:39:14	14:28:50	2	00:12:30	00:13:10	00:05:23
Schaufel 1	14:28:50	14:50:26	1	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 3	14:50:26	16:17:08	4	00:12:30	00:13:10	00:05:23
Schaufel 1	16:17:08	17:08:36	3	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 2	17:08:36	18:06:50	4	00:09:18	00:06:51	00:05:23
Schaufel 3	18:06:50	18:56:26	2	00:12:30	00:13:10	00:05:23
Schaufel 1	18:56:26	19:18:02	1	00:06:40	00:09:33	00:05:23
Schaufel 2	19:18:02	19:51:48	2	00:09:18	00:06:51	00:05:23

### 8.3.3 HAAS VF-2

Werkstück	Beginn	Fertigstellung	Losgröße	Rüstzeit	Bearbeitungszeit	Werkstückwechselzeit
Smartw.HT	07:05:00	08:10:58	3	00:04:58	00:17:50	00:02:30
Mount. Pl.	08:10:58	08:43:38	1	00:20:56	00:09:14	00:02:30
Smartw.VT	08:43:38	09:18:10	1	00:07:03	00:24:59	00:02:30
Mount. Pl.	09:18:10	10:02:34	2	00:20:56	00:09:14	00:02:30
Smartw.VT	10:02:34	11:32:04	3	00:07:03	00:24:59	00:02:30
Smartw.HT	11:32:04	11:57:22	1	00:04:58	00:17:50	00:02:30
Smartw.VT	11:57:22	12:31:54	1	00:07:03	00:24:59	00:02:30
Mount. Pl.	12:31:54	13:28:02	3	00:20:56	00:09:14	00:02:30
Smartw.VT	13:28:02	14:30:03	2	00:07:03	00:24:59	00:02:30
Smartw.HT	14:30:03	15:15:41	2	00:04:58	00:17:50	00:02:30
Smartw.VT	15:15:41	15:50:13	1	00:07:03	00:24:59	00:02:30
Smartw.HT	15:50:13	16:15:31	1	00:04:58	00:17:50	00:02:30
Smartw.HT	16:15:31	17:21:29	3	00:04:58	00:17:50	00:02:30
Smartw.VT	17:21:29	17:56:01	1	00:07:03	00:24:59	00:02:30
Smartw.HT	17:56:01	18:21:19	1	00:04:58	00:17:50	00:02:30

## 8.4 Quellcodes wichtiger Plant Simulation-Methoden

### Setze\_Bearbeitungszeit\_HERMLE

```

1  is
2  do
3      .Modelle.Netzwerk.HERMLE.Bearbeitungszeit :=
4      root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",@.TeileTyp]
5      ["Bearbeitungszeit",1];
6      .Modelle.Netzwerk.HERMLE.Rüstzeit :=
7      root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",@.TeileTyp] ["Rüstzeit",1];
8      @.umlagern(HERMLE);
9  end;
```

### Methode-HERMLE\_ausschalten

```

1  Is
2      Anzahl:integer;
3      Anzahlgesamt:integer;
4  do
5      Anzahlgesamt:=root.Stueck_gesamt["Anzahl_ges",1]
6      +root.Stueck_gesamt["Anzahl_ges",2]
7      +root.Stueck_gesamt["Anzahl_ges",3];
8
9      Anzahl:=Senke1.statAnzahlAus;
10
11     If
12         Anzahl>(Anzahlgesamt-1) then
13
14         HERMLE.pausieren;
15         HERMLEDL.pausieren;
16     end;
17 end;
```

### Methode-DL\_setzen

```

1  (Asch:integer)
2  is
3      Q_pkt:real; p:real; Leistung:real; phoch:real;
4      i:integer; AS:integer;
5  do
6      for i:=1 to
7      root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",ASCH] ["P_arbeitend",1].ydim
8      loop Q_pkt := root.Arbeitsplan
9      ["Arbeitsschritte",ASCH] ["P_arbeitend",1] ["Q",i];
10     p:=root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",ASCH]
11     ["P_arbeitend",1] ["p",i];
12     phoch:=pow(P, (0.4/1.4));
13     Leistung:=(360.39*Q_pkt)/((0.3+Q_pkt/5500)*60000)*(phoch-1);
14     root.Arbeitsplan["Arbeitsschritte",Asch]
15     ["P_arbeitend",1] ["DL",i]:=to_str(Leistung);
16     print Asch;
17     next;
18 end;
```

## Methode-Druckluft

```

1  is
2      Q_pkt:real; p:real; Leistung:real; phoch:real;
3      i:integer; AS:integer;
4
5  do
6      for AS:=1 to root.Arbeitsplan.ydim loop
7          DL_setzen (AS);
8          next;
9  end;
```

## Methode-Energie\_Ruest\_HERMLE

```

1  is
2      n:integer;
3      Energie_gesamt:real;
4      Schichtende:time;
5  do
6      Energie_gesamt:=HERMLE.statEnergieGesamtverbrauch+
7          HERMLEDL.statEnergieGesamtverbrauch;
8
9      If
10         HERMLE.ruestet then
11         Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE:=Energie_gesamt;
12
13         if .BEs.Teil1.statvernichtet=0 then
14             EPP_Teil1_Ruest:=0 else
15             EPP_Teil1_Ruest:=Teil1_Ruest_Energie/
16                 (.BEs.Teil1.statvernichtet/2);
17         end;
18
19         if .BEs.Teil2.statvernichtet=0 then
20             EPP_Teil2_Ruest:=0 else
21             EPP_Teil2_Ruest:=Teil2_Ruest_Energie/
22                 (.BEs.Teil2.statvernichtet/2);
23         end;
24
25         if .BEs.Teil3.statvernichtet=0 then
26             EPP_Teil3_Ruest:=0 else
27             EPP_Teil3_Ruest:=Teil3_Ruest_Energie/
28                 (.BEs.Teil3.statvernichtet/2);
29         end;
30
31         if Teileabfrage_HERMLE="Teil1" then
32             Teil1_Energie1:= Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE-
33                 Bestimmung_Ruest_End_HERMLE;
34             Teil2_Energie1:= 0;
35             Teil3_Energie1:= 0;
```

```
36
37     elseif Teileabfrage_HERMLE="Teil2" then
38         Teil1_Energie1:= 0;
39         Teil2_Energie1:= Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE-
40         Bestimmung_Ruest_End_HERMLE;
41         Teil3_Energie1:= 0;
42
43     elseif Teileabfrage_HERMLE="Teil3" then
44         Teil1_Energie1:= 0;
45         Teil2_Energie1:= 0;
46         Teil3_Energie1:= Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE-
47         Bestimmung_Ruest_End_HERMLE;
48     end;
49
50     else
51         Bestimmung_Ruest_End_HERMLE:=Energie_gesamt;
52         Teil1_Energie:=Teil1_Energie+Teil1_Energie1;
53     if .BEs.Teil1.statvernichtet=0 then
54         EPP_Teil1:=0 else
55         EPP_Teil1:=Teil1_Energie/
56         (.BEs.Teil1.statvernichtet/2);
57     end;
58     Teil2_Energie:=Teil2_Energie+Teil2_Energie1;
59     if .BEs.Teil2.statvernichtet=0 then EPP_Teil2:=0
60 else
61     EPP_Teil2:=Teil2_Energie/
62     (.BEs.Teil2.statvernichtet/2);
63 end;
64     Teil3_Energie:=Teil3_Energie+Teil3_Energie1;
65     if .BEs.Teil3.statvernichtet=0 then EPP_Teil3:=0
66 else
67     EPP_Teil3:=Teil3_Energie/
68     (.BEs.Teil3.statvernichtet/2);
69 end;
70
71     if HERMLE.IstGerüstetFür="Teil1" then
72         Teil1_Ruest_Energie:=
73         Teil1_Ruest_Energie+Bestimmung_Ruest_End_HERMLE-
74         Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE;
75         Teileabfrage_HERMLE:="Teil1";
76     elseif HERMLE.IstGerüstetFür="Teil2" then
77         Teil2_Ruest_Energie:=
78         Teil2_Ruest_Energie+Bestimmung_Ruest_End_HERMLE-
79         Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE;
80         Teileabfrage_HERMLE:="Teil2";
81     elseif HERMLE.IstGerüstetFür="Teil3" then
82         Teil3_Ruest_Energie:=
83         Teil3_Ruest_Energie+Bestimmung_Ruest_End_HERMLE-
84         Bestimmung_Ruest_Start_HERMLE;
85         Teileabfrage_HERMLE:="Teil3";
86     end;
87
88     end;
89
90     Schichtende:=Schicht["Schichtende", "HERMLE"];
91     If Ereignisverwalter.Zeit > Schichtende then
92         HERMLE.pausieren;
93         HERMLEDL.pausieren;
94     end;
95 end;
```

## 8.5 WinCC OA Quellcodes

### Quellcode: Zuordnung Leistungsniveaus-Betriebszustand

```
1 int Zustand = "";
2
3 main()
4 { if (getUserPermission(1))
5   { dyn_string dpeList;
6     dyn_string varList;
7     string dpe1 = sdCheckDpe("PAC2.:_online.._value");
8     if ( strlen(dpe1) )
9     { dynAppend(dpeList, dpe1);
10      dynAppend(varList, "Antr_Leistung_online_value");}
11   else{}
12
13   if (dpConnectUserData("cb_Callback_TEXT_FIELD2",
14     varList, true, dpeList) == -1 ){
15     sdShowBadConnect("TEXT_FIELD2", 3);}
16
17   else
18   {sdShowNoUserPermission("TEXT_FIELD2", 4);}
19     void cb_Callback_TEXT_FIELD2(
20       dyn_string varList, dyn_string dpeList, dyn_anytype
21       valueList)
22     {float Antr_Leistung_online_value;
23
24     for (int i = 1; i <= dynlen(varList); i++)
25
26       { if ( varList[i] == "Antr_Leistung_online_value" )
27         Antr_Leistung_online_value = valueList[i];}
28       sdDpSet(1,"Betriebszustand_Emco.:
29         _original.._value",Zustand);
30
31       if
32       ((Antr_Leistung_online_value>0.60&&
33         Antr_Leistung_online_value<0.78)||
34        (Antr_Leistung_online_value>0.15&&
35         Antr_Leistung_online_value<0.28))
36       sdMyFunction();
37
38     else if
39     (Antr_Leistung_online_value>(0.15)&&
40      Antr_Leistung_online_value<0.01)
41     sdMyFunction1();
42
43     else
44     sdMyFunction2();
45
46     sdShowValue("TEXT_FIELD2", "", Zustand, 0, "", 0, "");}
47
48     void sdMyFunction()
49
50     {sdCalculate(1,Zustand=1,Zustand);
```

```
51
52     if(shapeExists("TEXT_FIELD2"))
53     sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD2", 2, 1, Zustand==1, "rot");}
54
55     void sdMyFunction1()
56
57     {
58         sdCalculate(1,Zustand=0,Zustand);
59
60         if(shapeExists("TEXT_FIELD2"))
61         sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD2", 2, 1, Zustand==0,
62             "violett");}
63     void sdMyFunction2()
64
65     {
66         sdCalculate(1,Zustand=2,Zustand);
67         if(shapeExists("TEXT_FIELD2"))
68         sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD2", 2, 1, Zustand==2, "gelb");}
```

## Quellcode: Einbindung der Überbrückungszeit

```
1 float BZ_akt = "";
2 int BZ_akt_korr = "";
3
4 main()
5 {
6     if (getUserPermission(1))
7     {
8         dyn_string dpeList;
9         dyn_string varList;
10        string dpe1 = sdCheckDpe("BZ_EMCO_xSek.:_online.._value");
11        if ( strlen(dpe1) )
12        { dynAppend(dpeList, dpe1);
13          dynAppend(varList, "EMCO_BZ_online_value");}
14        else{}
15
16        if ( dpConnectUserData("cb_Callback_TEXT_FIELD1", varList, true,
17                              dpeList) == -1 ) {}
18    }
19    else {}
20 }
21 void cb_Callback_TEXT_FIELD1(
22     dyn_string varList, dyn_string dpeList,
23     dyn_anytype valueList)
24 {
25     float EMCO_Antr_online_value;
26     for (int i = 1; i <= dynlen(varList); i++)
27     { if ( varList[i] == "EMCO_BZ_online_value" )
28       EMCO_Antr_online_value = valueList[i]; }
29
30     dyn_mapping sdDpGetParams;
31     sdDpGetParams[1]["DP"]="BZ_EMCO_xSek.:_original.._value";
32     sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
33     sdDpGet(sdDpGetParams,"BZ_EMCO_xSek.:_original..
34             _value","1","BZ_akt");
35     BZ_akt = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
36
37     if (BZ_akt==0)
38     {BZ_akt_korr=0;}
39     else if (BZ_akt>0&&BZ_akt<=1)
40     {BZ_akt_korr=1;}
41     else if (BZ_akt>1&&BZ_akt<=2.3)
42     {BZ_akt_korr=2;}
43     else
44     {BZ_akt_korr=3;}
45
46     sdDpSet(1,"BZ_EMCO_mod.:_original.._value",BZ_akt_korr);
47     this.text(BZ_akt_korr);
48     if(shapeExists("TEXT_FIELD1"))
49     {sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD1", 2, 1, BZ_akt_korr==0, "green");
50      sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD1", 2, 1, BZ_akt_korr==1, "yellow");
51      sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD1", 2, 1, BZ_akt_korr==2, "red");
52      sdAssignColor(1, "TEXT_FIELD1", 2, 1, BZ_akt_korr==3, "blue"); }
53 }
```

## Quellcode: Erstellung der Ausgabetable

```
1  time Zpkt = "";
2  float aktueller_BZ = "";
3  float dpGetVar1 = "";
4  float Letzter_BZ = "";
5  time Zeitpunkt_letzter_Wechsel = "";
6  time Diff_Zeit = "";
7  time Summe_aus = "";
8  time Summe_BB = "";
9  time Summe_Bearb = "";
10
11 main()
12 {  if ( getUserPermission(1) )
13     { dyn_string dpeList;
14       dyn_string varList;
15       string dpe1 = sdCheckDpe("test_Sekundenwert.:_online.._value");
16       if ( strlen(dpe1) )
17         {  dynAppend(dpeList, dpe1);
18           dynAppend(varList, "BZ_akt_online_value");}
19       else {}
20       if ( dpConnectUserData("cb_Callback_TEXT_FIELD1", varList, true,
21                             dpeList) == -1 )
22     {  sdShowBadConnect("TEXT_FIELD1", 3); }}
23     else
24     {
25       sdShowNoUserPermission("TEXT_FIELD1", 4);}
26     }
27     void cb_Callback_TEXT_FIELD1(
28       dyn_string varList, dyn_string dpeList, dyn_anytype
29       valueList)
30     {
31       float BZ_akt_online_value;
32
33       for (int i = 1; i <= dynlen(varList); i++)
34         {if ( varList[i] == "BZ_akt_online_value" )
35           BZ_akt_online_value = valueList[i];}
36       dyn_mapping sdDpGetParams;
37       sdDpGetParams[1]["DP"]="Zeit_pro_BZ_past.:_original.._value";
38       sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
39
40       sdDpGet(sdDpGetParams,"Zeit_pro_BZ_past.:_original.._value",,,
41              1,"Letzter_BZ");
42       Letzter_BZ = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
43
44       {Zpkt=getCurrentTime();}
45
46       mappingClear(sdDpGetParams);
47       sdDpGetParams[1]["DP"]="ZPkt_Change.:_original.._value";
48       sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
49       sdDpGet(sdDpGetParams,"ZPkt_Change.:_original.._
50              value",1,"Zeitpunkt_letzter_Wechsel");
51       Zeitpunkt_letzter_Wechsel = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
52
53       sdCalculate(1,Zpkt-Zeitpunkt_letzter_Wechsel,Diff_Zeit);
54
55       if (Letzter_BZ==0)
56         schreibe_auf_Aus();
57     }
```

```
58     if (Letzter_BZ==1)
59         Schreibe_auf_BB();
60
61     if (Letzter_BZ==2)
62         Schreibe_auf_Bearb();
63
64     sdDpSet(1,"ZPkt_Change.:_original.._value",Zpkt);
65
66     mappingClear(sdDpGetParams);
67     sdDpGetParams[1]["DP"]="test_Sekundenwert.:_original.._value";
68     sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
69
70         sdDpGet(sdDpGetParams,"test_Sekundenwert.:_
71             original.._value","1","aktueller_BZ");
72     aktueller_BZ = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
73     sdDpSet(1,"Zeit_pro_BZ_past.:
74         _original.._value",aktueller_BZ);}
75
76     void schreibe_auf_Aus()
77
78 { dyn_mapping sdDpGetParams;
79     sdDpGetParams[1]["DP"]="Summe_Zeit_Aus.:_original.._value";
80     sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
81     sdDpGet(sdDpGetParams,"Summe_Zeit_Aus.:_original..
82         _value","1","Summe_aus");
83     Summe_aus = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
84     sdCalculate(1,Summe_aus+Diff_Zeit,Summe_aus);
85     sdDpSet(1,"Summe_Zeit_Aus.:_original.._value",Summe_aus);
86     sdShowValue("TEXT_FIELD1", "", period(Diff_Zeit), 0, "", 0, "");}
87
88     void Schreibe_auf_BB()
89     { dyn_mapping sdDpGetParams;
90     sdDpGetParams[1]["DP"]="Summe_Zeit_BB.:_original.._value";
91     sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
92     sdDpGet(sdDpGetParams,"Summe_Zeit_BB.:_original..
93         _value","1","Summe_BB");
94     Summe_BB = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
95
96     sdCalculate(1,Summe_BB+Diff_Zeit,Summe_BB);
97     sdDpSet(1,"Summe_Zeit_BB.:_original.._value",Summe_BB);
98
99     sdShowValue("TEXT_FIELD1", "", period(Diff_Zeit), 0, "", 0, "");}
100
101     void Schreibe_auf_Bearb()
102     { dyn_mapping sdDpGetParams;
103     sdDpGetParams[1]["DP"]="Summe_Zeit_Bearb.:_original.._value";
104     sdDpGetParams[1]["TYPE"]=1;
105     sdDpGet(sdDpGetParams,"Summe_Zeit_Bearb.:_original..
106         _value","1","Summe_Bearb");
107     Summe_Bearb = sdDpGetParams[1]["VALUE"];
108
109     sdCalculate(1,Summe_Bearb+Diff_Zeit,Summe_Bearb);
110     sdDpSet(1,"Summe_Zeit_Bearb.:_original.._value",Summe_Bearb);
111
112     sdShowValue("TEXT_FIELD1", "", period(Diff_Zeit), 0, "", 0, "");}
```

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] C. Hermann, S. Thiede und T. Heinemann, „Ganzheitliche Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion“ in *Giesserei Ausgabe 2*, pp. 1-2, 2015.
- [2] M. Weck und C. Brecher, *Werkzeugmaschinen 4, Automatisierung von Maschinen und Anlagen*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [3] R. Neugebauer, *Werkzeugmaschinen, Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [4] DIN 61131-1, *Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Informationen*, 2003.
- [5] H. Kief und R. Helmut, *CNC-Handbuch 2013/2014, CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Simulation, Fachwortverzeichnis*, München: Carl-Hanser-Verlag, 2013.
- [6] K. Kurbel, *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management*, München: Oldenbourg-Verlag, 2005.
- [7] M. Ventzislavova und C. Hensel, *Betriebswirtschaftliche Formelsammlung, Betrieblicher Leistungsprozess*, Berlin: Books-On-Demand-Verlag, 2012.
- [8] M. Hessler und M. Görtz, *ERP Systeme im Einsatz, Bearbeitung typischer Geschäftsvorfälle mit Microsoft Dynamics NAV 5.0*, Witten: W3L-Verlag, 2009.
- [9] O. Specht, M. Ceyp und H. Schweer, *Markt- und ergebnisorientierte Unternehmensführung für Ingenieure und Informatiker*, München: Oldenbourg-Verlag, 2005.
- [10] H. Haag, *Eine Methodik zur modellbasierten Planung und Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion*, Stuttgart: Fraunhofer-Verlag, 2013.
- [11] J. Biethahn, H. Mucksch und W. Ruf, *Ganzheitliches Informationsmanagement, Band 1: Grundlagen*, München: Oldenbourg-Verlag, 2004.

- [12] F. Bleicher, J. Bernreiter, C. Dorn und S. Brandstetter, Bericht Energetische Untersuchung von Werkzeugmaschinen, Wien: Technische Universität, Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslaser, 2010.
- [13] A. Dietmair, A. Verl und M. Wosnik, „Zustandbasierte Verbrauchsprofile, Eine Methode zur effizienten Erfassung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen“ in *wt werkstatttechnik*, pp. 640-645, 7/8 2008.
- [14] R. Neugebauer, Handbuch Ressourcenorientierte Produktion, München: Carl-Hanser-Verlag, 2014.
- [15] T. Bauernhansl, M. ten Hompel und B. Vogel-Heuser, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Anwendung, Technologien, Migration, Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag, 2014.
- [16] WAGO Kontakttechnik, Handbuch WAGO-I/O-SYSTEM 750 Feldbuskoppler ETHERNET 750-352, Minden: WAGO Kontakttechnik GmbH & Co. KG, 2013.
- [17] C. Faller, B. Hünermund und C. Plass, „Energiedatenmanagement und -messtechnik“ in *Ressourcenorientierte Bewertung und Optimierung von Prozessketten*, Frankfurt am Main, VDMA Verlag, 2012, pp. 86-99.
- [18] E. Hering, K. Bressler und J. Gutekunst, Grundlagen der Elektrotechnik, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [19] E. Müller, J. Engelmann, T. Löffler und J. Strauch, Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [20] J. Hesselbach, Energie- und klimaeffiziente Produktion, Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele, Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag, 2012.
- [21] LEM 100-SD, Datenblatt: AC Current transformer TT, [www.lem.com](http://www.lem.com). [Zugriff am 19. 1. 2015].
- [22] T. Mühl, Einführung in die elektrische Messtechnik, Grundlagen, Messverfahren, Geräte, Wiesbaden: Springer-Vieweg-Verlag, 2008.
- [23] C. Nieschwitz, "Von der Energieflussanalyse zur Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion" in *Tagungsband Energieeffizienz in der Produktion*, Düsseldorf: Hanser-Verlag, 2010.
- [24] C. Hermann, G. Posselt und T. Sebastian, Energie- und hilfsstoffoptimierte Produktion, Berlin Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag, 2013.

- [25] L. März, W. Krug, O. Rose und G. Weigert, Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik, Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [26] G. Kemnitz, Technische Informatik, Band 2: Entwurf digitaler Schaltungen, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [27] S. Wenzel, M. Weiß, S. Böhmer, H. Pitsch und O. Rose, Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik, Planung und Durchführung von Simulationsstudien, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [28] R. Reussner, Handbuch der Software-Architektur, Heidelberg: Dpunkt-Verlag, 2006.
- [29] P. Eberspächer und A. Verl, „Realizing energy reduction of machine tools through a controlintegrated consumption graph-based optimization method“ in *Procedia CIRP* 7, p. 640 – 645, 2013.
- [30] U. Heisel und S. Braun, „Prognose des prozessabhängigen Energieverbrauchs, Simulations- und Prognosemodell des prozessabhängigen Energieverbrauchs von Werkzeugmaschinen – Teil 1“ in *wt Werkstattstechnik online*, pp. 16 - 21, Jahrgang 103 2013.
- [31] U. Hedtstück, Simulation diskreter Prozesse, Methoden und Anwendungen, Berlin Heidelberg: Springer-Vieweg-Verlag, 2013.
- [32] S. Bangsow, Fertigungssimulation mit Plant Simulation und Sim Talk, München: Carl-Hansen-Verlag, 2008.
- [33] D. Herzog, Fertigungsprozessmodellierung zur Simulation und Prognose des Produktionsenergiebedarfs, Wien: Fachhochschule Technikum Wien, 2013.
- [34] R. Kapp, Ein betriebsbegleitendes Fabriksimulationssystem zur durchgängigen Unterstützung der kontinuierlichen Fabrikadaption, Stuttgart: Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik, Universität Stuttgart, 2011.
- [35] M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov, Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [36] U. Bracht, D. Geckler und S. Wenzel, Digitale Fabrik, Methoden und Praxisbeispiele, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

- [37] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme: Technologie, Berechnung, Simulation, München: Carl-Hanser-Verlag, 2013.
- [38] K. Offner, Betriebliches Energiemanagement, Qualitätsmerkmale, Lieferantenfestlegung, Qualitätstechniken, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 2001.
- [39] B. Schieferdecker, Energiemanagement-Tools, Anwendung im Industrieunternehmen, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
- [40] V. Sandor, Integrated Design Engineering, Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [41] E. Abele, S. Schrems und P. Schraml, „Energieeffizienz in der Fertigungsplanung, Frühzeitige Abschätzung des Energieverbrauchs von Produktionsmaschinen in der Mittel- und Großserienfertigung“ in *wt Werkstattstechnik online* , pp. 38-43, Jahrgang 102H. 1/2 2012 .
- [42] W. Eversheim, Organisation in der Produktionstechnik, Arbeitsvorbereitung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2002.
- [43] H.-J. Bullinger, W. Eversheim und H.-D. Haasis, Auftragsabwicklung optimieren nach Umwelt- und Kostenzielen, OPUS — Organisationsmodelle und Informationssysteme für einen produktionsintegrierten Umweltschutz, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [44] W. Eversheim, Organisation in der Produktionstechnik 3: Arbeitsvorbereitung, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [45] Aspern IQ, <http://www.asperniq.at/fakten/aspern-iq-das-plusenergiebuerogebaeude/> [Zugriff am 31. 03. 2015].
- [46] EMCO Maier Ges.m.b.H, EMCO MAXXTURN 45, Universal-Drehzentrum für die Komplettbearbeitung von Stangen- und Futterteilen, Hallein-Taxach: EMCO Maier Ges.m.b.H, 2014.
- [47] Berthold Hermle AG, „[www.hermle.de](http://www.hermle.de)“ [Zugriff am 31. 03. 2015].
- [48] Berthold Hermle AG, Hermle C42 Technische Daten, Gosheim: Berthold Hermle AG, 2013.
- [49] Haas Automation Inc., <http://int.haascnc.com/> [Zugriff am 31 April 2015].

- [50] Haas Automation Inc., [http://int.haascnc.com/we\\_spec1.asp?intLanguageCode=1031&id=VF-2&sizeID=30\\_40INCH\\_VMC](http://int.haascnc.com/we_spec1.asp?intLanguageCode=1031&id=VF-2&sizeID=30_40INCH_VMC). [Zugriff am 18 März 2015].
- [51] Siemens AG, Elektrische Messwerte und Energie zuverlässig und präzise im Blick, Multifunktionsmessgerät Sentron PAC, [www.siemens.de/powermanagemetsystem](http://www.siemens.de/powermanagemetsystem): 04.03.2015, 2009.
- [52] Festo AG&Co. KG, Datenblatt Durchflusssensor SFAB, 2015.
- [53] Festo AG&Co. KG, Datenblatt Drucksensor SDE1, 2015.
- [54] A. Schwab, Elektroenergiesysteme, Erzeugung, Transport, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2012.
- [55] ETM professional control GmbH, WinCC OA Online Hilfe, 2013.
- [56] Siemens Product Lifecycle Management Software GmbH, Plant Simulation-Produkt Übersicht; Simulation, Visualisierung, Analyse und Optimierung von Produktions- und Logistikprozessen, Köln: [www.siemens.com/plm](http://www.siemens.com/plm), 2008.
- [57] Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., Tecnomatix Plant Simulation Hilfe, Köln, 2013.
- [58] Siemens AG, Sinumerik 840D sl/828D Grundfunktionen, Nürnberg: [www.siemens.com/motioncontrol](http://www.siemens.com/motioncontrol), 2011.
- [59] Siemens AG, Sinumerik, Simodrive, Lists 2nd Book, Nürnberg: [www.siemens.com/motioncontrol](http://www.siemens.com/motioncontrol), 2006.
- [60] Siemens AG, Sinumerik 840D sl/840Di sl/840D/840Di/810D Grundlagen, Programmierhandbuch, Nürnberg: [www.siemens.com/motioncontrol](http://www.siemens.com/motioncontrol), 2006.
- [61] Siemens AG, SINUMERIK 840D sl, SINAMICS S120 Maschinendaten und Paramete, Listenhandbuch, Nürnberg: [www.siemens.com/motioncontrol](http://www.siemens.com/motioncontrol), 2013.
- [62] C. Hermann, S. Thiede und T. Heinemann, „Ganzheitliche Ansätze zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz in der Produktion“ in *Giesserei Ausgabe 2*, pp. 1-2, 15 Juli 2015.

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Handlungsfelder des Themenfelds Energieeffizienz in der Produktion...	9
Abbildung 2: Aufgaben der Steuerung einer Werkzeugmaschine .....	11
Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Werkzeugmaschinensteuerung .....	12
Abbildung 4: Subsysteme einer Werkzeugmaschine .....	16
Abbildung 5: Betriebszustände und Leistungsaufnahme der Komponenten .....	17
Abbildung 6: Verarbeitung von Maschinensignalen.....	19
Abbildung 7: Sternschaltung.....	22
Abbildung 8: Dreieckschaltung .....	22
Abbildung 9: Prinzip eines Stromwandlers, Beispiel eines Stromwandlers .....	23
Abbildung 10: Generierung von Messdaten anhand von Messgrößen.....	24
Abbildung 11: Dedizierte Messgeräte - Energiezähler, Universalmessgeräte und Netzanalysatoren .....	25
Abbildung 12: Gliederung von Produktionsstandorten .....	26
Abbildung 13: Erweiterung der Messaufgabe.....	27
Abbildung 14: Energieportfolio .....	28
Abbildung 15: Messdaten in unterschiedlichen Auflösungen .....	29
Abbildung 16: Energieverbrauchs- und Nutzungsprofil .....	32
Abbildung 17: Messung und Berechnung des Leistungsaufnahmeprofils .....	33
Abbildung 18: Erweiterungen des zustandsbasierten Energieverbrauchsmodells ....	33
Abbildung 19: Typen von Systemen.....	36
Abbildung 20: Ablaufschema einer ereignisorientierten Simulation.....	38
Abbildung 21: Beispielhafte Darstellung des Ablaufs einer ereignisorientierten, diskreten Simulation .....	40
Abbildung 22: Kopplung der Materialflusssimulation mit dem Energiefluss.....	41
Abbildung 23: Handlungsansätze zur Verbesserung der Energieeffizienz am Beispiel der Nutzung von elektrischen Energie.....	42
Abbildung 24: Handlungsansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in Produktionsanlagen.....	44
Abbildung 25: Einflussmöglichkeiten auf den späteren Energieverbrauch in den Phasen der Arbeitsvorbereitung .....	48
Abbildung 26: Zeitlicher Ablauf der Tätigkeiten innerhalb der Arbeitsablaufplanung.	49
Abbildung 27: Aufbau und Ermittlung von Vorgabezeiten .....	50
Abbildung 28: Abbildung des Seestadt IQ-Gebäudes und die Maschinen der mi- factory .....	52
Abbildung 29: Übersichtsplan und Maschinenaufstellung der mi-factory .....	53
Abbildung 30: Drehzentrum EMCO Maxxturn 45 .....	54
Abbildung 31: 5-achsiges Bearbeitungszentrum HERMLE C42U .....	55
Abbildung 32: Vertikales Bearbeitungszentrum HAAS VF2 .....	56

Abbildung 33: Schematischer Aufbau der Messtechnik .....	57
Abbildung 34: SENTRON PAC 3200 und 4200 .....	58
Abbildung 35: Druckschalter Festo SDE1 und Durchflussmessgerät Festo SFAB ...	60
Abbildung 36: Rolle von WinCC OA innerhalb eines Automatisierungssystems .....	61
Abbildung 37: Manager eines WinCC OA Systems .....	62
Abbildung 38: Beispiel für eine Modellierung in Plant Simulation .....	66
Abbildung 39: Schematische Darstellung der Messpunkte in der mi-factory .....	68
Abbildung 40: WinCC OA-Hauptpanel für die Aspern IQ mi-factory .....	69
Abbildung 41: Leistungsaufteilung der gesamten Halle und für eine Maschine .....	70
Abbildung 42: Beispiel für einen Lastgang .....	70
Abbildung 43: Beispiel für die Leistungsaufnahme einer Maschine in verschiedenen Betriebszuständen .....	71
Abbildung 44: Parametrierung eines Datenpunkts zur Integration eines Signals aus der Steuerung in WinCC OA .....	73
Abbildung 45: Bestimmung des Betriebszustandes über definierte Leistungsbänder .....	74
Abbildung 46: Energierückführung während eines Bremsvorganges der Spindel .....	75
Abbildung 47: Darstellung der Betriebszustände mit WinCC OA .....	76
Abbildung 48: Exemplarische Ausgabe der Zeitanteile in verschiedenen Betriebszuständen, Zeitpunkte der Zustandswechsel und Energie-pro-Stück in WinCC OA-Vision .....	76
Abbildung 49: Systemskizze Erfassung der Betriebs- und Maschinendaten für die Simulation .....	77
Abbildung 50: In der mi-Factory aufgenommene Daten der Bauteilbearbeitungen ...	78
Abbildung 51: Verwendete Bausteine bei der Darstellung einer Werkzeugmaschine in Plant Simulation .....	79
Abbildung 52: Beispiel einer Energie-Registerkarte und der Energiestatistik für ein Materialfussobjekt in Plant Simulation .....	83
Abbildung 53: Quellcode der Methode E_HERMLE in Plant Simulation .....	84
Abbildung 54: Leistungsaufnahme einer Maschine zufolge elektrischer und pneumatischer Anteile .....	85
Abbildung 55: Gesamtsystem mi-factory in Plant Simulation .....	87
Abbildung 56: Simulierter Lastgang dargestellt mit dem Energy-Analyzer .....	88
Abbildung 57: Vergleich der simulierten und realen Lastgänge aller Maschinen (3.2.2015) .....	89
Abbildung 58: Vergleich der simulierten mit der realen Leistungskurve für die Kompressorleistung (3.2.2015) .....	89
Abbildung 59: Vergleich der gemessenen Leistungsaufnahme der gesamten Maschinenhalle mit der Maschinen- und Kompressorsimulation (3.2.2015) .....	90
Abbildung 60: Simulierter Lastgang in der Ausgangssituation (3.2.2015) .....	92

---

Abbildung 61: Simulierter Lastgang-Betriebszustandsoptimiert in arbeitsfreien Zeiten .....	92
Abbildung 62: Simulierter Lastgang-Betriebszustandsoptimiert in arbeitsfreien Zeiten und im Stillstand .....	92
Abbildung 63: Simulierter Lastgang-Druckabsenkung um 1 bar .....	93
Abbildung 64: Ablauf der Experimente .....	94
Abbildung 65: Tageslastgänge der einzelnen Maschinen in der Ausgangslage der Experimente .....	95
Abbildung 66: Gantt-Diagramm der produzierten Bauteile auf EMCO Maxxturn 45..	96
Abbildung 67: Manipulation eines Bauteil-Lastganges zur fiktiven Reduktion der Bearbeitungszeit.....	97
Abbildung 68: Darstellung des Einflusses der Eingabegrößen auf die Energie-pro-Stück der Maschinen in der mi-factory .....	99
Abbildung 69: Einfluss der Eingangsfaktoren auf ihre Energie-pro-Stück der auf der HERMLE C42U gefertigten Bauteile .....	101
Abbildung 70: Einfluss der Rüst-, Werkstückwechsel-, Bearbeitungszeit und Losgröße auf die Energie-pro-Stück der Maschinen der mi-factory .....	102
Abbildung 71: Auswirkung der Eingangsfaktoren auf die mittlere Energie-pro-Stück (HERMLE C42U, HAAS VF-2, EMCO Maxxturn 45) .....	104

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einteilung der Betriebsdaten mit Beispielen .....	13
Tabelle 2: Technische Kerndaten EMCO Maxxturn 45 .....	54
Tabelle 3: Technische Kerndaten HERMLE C42U .....	55
Tabelle 4: Technische Kerndaten HAAS VF2.....	56
Tabelle 5: Adressen einiger wichtiger Steuerungssignale .....	72
Tabelle 6: Grenzwerte für die Bestimmung der Betriebszustände.....	75
Tabelle 7: Bearbeitungs- und Rüstzeiten der am 03. Februar 2015 in der mi-factory produzierten Teile.....	88
Tabelle 8: Abweichungen der Tagesenergieverbräuche der Simulation gegenüber dem realen System (3.2.2015) .....	90
Tabelle 9: Optimierungspotenzial der energetisch optimierten Szenarien.....	93
Tabelle 10: Eingabewerte für das mehrstufige Simulationsexperiment.....	97
Tabelle 11: Bestimmung der maximalen Losgröße .....	98
Tabelle 12: Kerndaten der Bauteile auf HERMLE C42U .....	100
Tabelle 13: Wichtige Eckdaten der Maschinen.....	102
Tabelle 14: Leistungs- und Zeitverhältnis vom Bearbeitungs- zum Rüstvorgang der Maschinen .....	103

## 12 Abkürzungsverzeichnis

ANSI	American National Standards Institute
API	Application Programming Interface
BAG	Betriebsartengruppe
BDE	Betriebsdatenerfassung
BE	Bewegliches Element
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CBEMA	Computer and Business Equipment Manufacturers Association
CNC	Computerized Numerical Control
COM	Communication
csv	Comma seperated values
CTRL	Control
d.h.	das heißt
DB	Datenbank
DB	data block (Datenbaustein)
DES	Discret Event Simulation
DLZ	Durchlaufzeit
dp	Datenpunkt
E/A	Eingang/Ausgang
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EN	Europäische Norm
EPP	Energy per piece
etc.	et cetera
EV	Event Manager
exkl.	exklusive
f.	folgend
FEM	Finite Elemente Methode
ff.	fortlaufend folgend
ggf.	gegebenenfalls
GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
HMI	Human Machine Interface
HS	Hauptspindel
HTML	Hypertext markup language
i.d.R.	in der Regel
IE	Industrial Engineering, Industrial Engineer (Person)

IEC	International Electrotechnical Commission
inkl.	Inklusive
IP	International Protection
IQ	Intelligenz Quotient
ITIC	Information Technology Industry Curve
JOG	Jogging
KSS	Kühlschmierstoff
lt.	laut
MDA	Manual Data Automatic
MDE	Maschinendatenerfassung
MID	Measuring Instruments Directive
Min.	Minuten
NC	Numerical Control
o.g.	oben genannt
OLE	Object Linking and Embedding
OPC	OLE for Process Control
opt.	optional
PAC	Power Analysis Control
PC	Personal Computer
PLC	programmable logic controller
PLM	Product Life Cycle
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
S.	Seite
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
Sek.	Sekunden
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured query language
Std.	Stunden
Stk.	Stück
TCP	transmission control protocol
THD	Total Harmonic Distortion
tlw.	teilweise
TPS	Toyota Produktionssystem
u.a.	unter anderem
UI	User Interface
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vgl.	vergleiche
WinCC OA	Windows Control Center Open Architecture
XML	extensible markup language
z.B.	zum Beispiel