

Thomas Mücke

Informationssystematik zur Optimierung von Konstruktions- und NC- Prozessen

Ganzheitliche Optimierung durch Vernetzung von PLM-, ERP- und MES geprägten Prozessen unter Berücksichtigung von Betriebsmittel-Informationen aus der Fertigung



Technische Universität Sofia



Fakultät für deutsche Ingenieur- und Betriebswirtschaftsusbildung
Doktorandenschule



FDIBA

DISSERTATION

Informationssystematik zur Optimierung von Konstruktions- und NC-Prozessen

Ganzheitliche Optimierung durch Vernetzung von PLM-, ERP- und MES
geprägten Prozessen unter Berücksichtigung von Betriebsmittel-
Informationen aus der Fertigung

Berufsfeld: 5.2 Elektrotechnik, Elektronik und Automatik
Wissenschaftliches Fach: Automatisierte Systeme zu Bearbeitung von Information und
Steuerung

Vorgelegt von Dipl.-Ing. Thomas Mücke

Wissenschaftlicher Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Vassil Galabov

Sofia
2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in
der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-7448-7892-0

Covergestaltung:
Thomas Mücke

Herstellung und Verlag:
BoD - [Books on Demand](#), Norderstedt

2. ergänzte Ausgabe 05/2017
© 2017 Thomas Mücke

Alle Rechte vorbehalten. Dieses Werk, sowie darin alle enthaltenen einzelnen Beiträge, Methoden und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberschutz zugelassen ist, bedarf der vorigen Zustimmung des Autors. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Auswertungen durch Datenbanken und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme.

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) von der Fakultät der deutschen Ingenieurs- und Betriebswirtschaftsusbildung (FDIBA) an der TU Sofia und des Instituts für Informationsmanagement im Ingenieurwesen (IMI) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Thomas Mücke

Tag der mündlichen Prüfung: 19.05.2017

Prüfungskommission

Vorsitzender:	Prof. Dr. Ing. Mladen Milushev	FDIBA
Wissenschaftlicher Betreuer:	Prof. Dr. Ing. Vasil Galabov	FDIBA
Gutachter:	Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova	KIT-IMI
Gutachter:	Prof. Ing. Hristo Konstantinov Shatov	TU Sofia
Gutachter:	Prof. Ing. Chavdar Ivanov Damyanov	TU Sofia

Kurzfassung

Die technischen und betriebswirtschaftlichen Bereiche sind heute nicht durchgängig vernetzt. Im Rahmen des durchgängigen Engineerings, welche eine wichtige Rolle von Industrie 4.0 spielt, ist das Information Retrieval im Produktionsprozess ein wesentlicher Faktor. Die intelligente Rückführung der Daten führt zu technischen und wirtschaftlichen Vorteilen.

Durch die horizontale und vertikale Integration der Bereiche erzielt man neue Effekte bei einer ganzheitlichen Optimierung.

In der Konstruktion werden ca. 70% der Produktkosten definiert; durch heutige Vernetzungstechniken hat man bereits im CAD-System Zugriff auf Ressourcen Informationen aus der Fertigung, welche eine neue Art der Kostenreduzierung möglich machen.

Durch eine fertigungsgerechte Konstruktion ist ein optimierter Prozess möglich, ebenfalls kann bereits der Arbeitsplan für das ERP-System und die Kalkulation aus dem 3D-Bauteilmodell im CAD abgeleitet werden.

Auf dieser Basis können über AFR's (**A**utomatic **F**eature **R**ecognition) automatisiert NC-Programme für Alternativmaschinen erstellt werden. Dadurch erhält man in der Produktion die Flexibilität, um Durchlaufzeiten zu reduzieren.

Aufgrund der Maschinensignale können über die Maschinenkonnektoren Informationen in übergeordnete Systeme zurückfließen, so dass ein PDCA-Prozess (Verbesserungsprozess) ganzheitlich im Bereich der Logistik, als auch im technischen Bereich vorhanden ist. Mittels den Daten aus der Maschine wird eine Technologiedatenbank aufgebaut, welche die Basis für die Optimierung in der Konstruktion und NC-Programmierung bildet.

Die ganzheitliche Vernetzung ermöglicht einen wesentlich verbesserten Prozess von der Konstruktion bis zur Produktion. Die Methodik für die Optimierung der Daten aus der Maschine mittels Big Data wird im Rahmen dieser Arbeit dargestellt.

Hierbei werden die Effekte auf Basis der Real-time Daten von den verschiedenen Systemen innerhalb des Reportings und der Visualisierung dargestellt, so dass der Mensch durch die Echtzeitdaten bei der Entscheidungsfindung unterstützt wird. Hierbei wird auch die Bedeutung der Mitarbeiter in der Gesamtkette dargestellt, welche zukünftig verstärkt mittels mobilen Anwendungen unterstützt werden.

Aufgrund der Datenanalyse können übergreifende Verbesserungen dargestellt werden, wobei durch Echtzeitdaten zusätzlich eine Reduzierung der Datenpflege durch selbstoptimierende Funktionen erzielt werden. Dies führt in der mechanischen Produktion zu reduzierten Werkzeugkosten und einer verbesserten Teilefamilienbildung im Produktionsbereich, welche wiederum weitergehende Auswirkungen auf die Kostenstrukturen hat.

Die Arbeit, welche in Zusammenarbeit mit dem Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen des Karlsruher Instituts für Technologie und der Fakultät für deutsche Ingenieur- und Betriebswirtschaftsausbildung an der TU Sofia erstellt wurde, stellt die Effekte bei Zerspanungsprozessen dar. Dies wurde durch eine Referenzinstallation am KIT-IMI evaluiert. Anhand technologischer Echtzeitdaten aus der Werkzeugmaschine sind die Optimierungen erzielt worden.

Damit im Gesamtprozess die produktiven und nicht produktiven Bereiche (wertschöpfende und nicht wertschöpfende Bereiche) effektiver integriert werden können, um die notwendigen Kosteneinsparungen zu erzielen, ist die Vernetzung ein Schwerpunkt der Dissertation. Es wird dargestellt, welche Effekte aufgrund technologischer Daten aus

den Werkzeugmaschinen beim Zerspanungsprozess auf Basis von Betriebsmittelinformationen entstehen und wie die Informationen aus dem Produktionsbereich in den Planungsprozess optimiert überführt werden. Somit ist eine stetige Produktverbesserung gegeben, welche einen direkten Einfluss auf die Produkt- und Herstellkosten haben.

Basierend auf der Erhöhung der gesamten Wertschöpfungskette wird im [Kapitel 6.5.2](#) dargestellt, wie mittels der definierten Big-Data-Analytik neue Geschäftsmodelle generiert werden können. Am Beispiel der Werkzeuge wird dargestellt, welche erheblichen Auswirkungen eine vernetzte Kunden-, Lieferantenbeziehung auf die Gesamtprozesskette durch Servicekonzepte haben kann.

Abstract

The technical and commercial areas are not really connected. Within the scope of the integrated engineering, which plays an important role of industry 4.0, the information retrieval in the production process is a crucial factor. The intelligent return of the data leads to technical and economic advantages.

Through the horizontal and vertical integration of the areas, new effects are achieved as a result of holistic optimization.

Approximately 70% of the product costs are defined by the design department and today's networking technologies allow access to resource information from the manufacturing process, which creates new possibilities of cost reduction. An optimized process is possible through manufacturing-suitable design. The work plan for the ERP system and the pre-calculation can also be derived from the 3D part model in the CAD-system.

Based on the optimized design part it's possible to create the NC-program via AFR (Automatic Feature Recognition) automatically for alternative machine tools. This gives the production flexibility in order to reduce output times.

Due to the machine signals, the real time data can be transferred back to superordinate systems via the machine connectors so that a PDCA process (Continuous Improvement Process) is integrated in the area of logistics as well as in the technical area. By means of the data from the machine, a technology database is automatically built, which forms the basis for optimization in design and NC-programming areas.

The holistic networking enables a significantly improved process, from the design to production area. The methodology for the optimization of the data from the machine on big data methods is presented in this work.

The effects on the basis of the real-time data from different systems within the reporting and the visualization are displayed so that the human being is supported by the real-time data in a quick decision-making process. This also shows the importance of the employees in the overall chain, which will be increasingly supported through mobile applications in the future.

Additional comprehensive improvements can be presented by means of the data analysis, whereby a reduction in the data maintenance by self-optimizing functions is achieved by means of real-time data. This results in mechanical production in addition to reduced tool costs and improved part-family production in the production area, which in turn has a further impact on cost structures.

The work, which was developed in collaboration with the Institute for Information Management in Engineering of the Karlsruhe Institute of Technology and the Fakultät für deutsche Ingenieur- und Betriebswirtschaftsausbildung at the TU Sofia, illustrates the effects in machining processes. This was evaluated by a reference installation at KIT-IMI. The optimization is achieved using technological real-time data from the machine tool.

To ensure that the productive and non-productive areas (value-creating and non-value-creating areas) can be integrated more effectively in the overall process in order to achieve the necessary cost savings, connectivity and data-analytics is the focus of the dissertation. It shows the effects resulting from technological data on the basis of re-

source information and how the information from the production area is transferred to the planning process in an optimized manner. This results in a continuous product improvement, which has a direct impact on product and manufacturing costs. Based on the increase in the entire value-added chain, chapter 6.5.2 shows how new business models can be generated using the defined big-data analysis. Using the example of the tools, it is shown which significant effects a networked customer and supplier relationship can have on the overall process chain through service concepts

Vorwort

Der Produktionsstandort steht aufgrund der Globalisierung im verstärkten Wettbewerb. Die Wettbewerbsfähigkeit und der Erfolg wird erheblich davon bestimmt, wie die Unternehmen ihre Vorteile bei geänderten Rahmenbedingungen durch die Digitalisierung, den gestiegenen Kundenanforderungen gegenüber dem Wettbewerb mit geringeren Kosten, besserer Qualität und kürzeren Lieferzeiten Vorteile erzielen können. Hierbei sind nicht nur die heutigen konventionellen Fertigungsverfahren zu berücksichtigen, sondern auch additive Verfahren, welche sicherlich bei der Herstellung von kleinen Stückzahlen in Zukunft an Bedeutung zunehmen werden; somit sind Auswirkungen auf den Konstruktionsprozess elementar.

Durch die CIM-Methoden wurden in den 90er Jahren bereits versucht ganzheitliche Optimierungen zu realisieren. Aufgrund der damaligen technischen Möglichkeiten und der Philosophie alle Informationen in einer Datei abzuspeichern war dies per Definition schwierig zu realisieren. Durch heutige Techniken werden die in den jeweiligen Bereichen entstandenen Daten und Dokumente dezentral vernetzt, so dass eine gesamtheitliche Optimierung möglich ist. Hierbei ist im Gegensatz zu den 90er Jahren nicht der Gedanke, dass alles automatisiert abläuft, sondern der Mensch die Automatisierung und die vernetzten Anlagen (CPS's) beherrscht und aufgrund der Echtzeitdaten aus der Maschine und entsprechenden Aufbereitungen der Daten mittels Visualisierung, die dementsprechenden Entscheidungen zur Prozess-Optimierung schnell und einfach treffen kann.

Nachdem ich seit den 90er Jahren in diesem Bereich tätig bin, ist es mir ein besonderes Anliegen, mit den heutigen Techniken die gewünschten Effekte, welche man bereits damals erzielen wollte, heute zu realisieren.

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Consulting-Tätigkeit bei der Fa. TDM Systems GmbH in Tübingen, welche mir die Möglichkeit gab, dies zu erstellen. Hierbei habe ich meine Erfahrung in dem Themengebiet aufgrund meiner langjährigen Tätigkeit als Projektleiter im CAD/CAM/MES-Umfeld einfließen lassen.

Hierzu möchte ich mich herzlich bei meinem Arbeitgeber bedanken, aber auch bei der Institutsleitung vom KIT-IMI Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova, der FDIBA an der TU Sofia, dem Prodekan Maschinenbau Herr Prof. Dr.-Ing. Vassil Galabov für die wissenschaftliche Betreuung und Frau Dipl.-Ing. Julia Popowa für Übersetzungen. Desweiteren möchte ich mich bei den Mitarbeitern des Institutes und den Partnerfirmen für die angenehme, vertrauensvolle und interdisziplinäre Zusammenarbeit bedanken. Im Besonderen bei den wissenschaftlichen Mitarbeitern Herrn M.Sc. Klemens Haas und Herrn B.Sc. Filip Szeliga, welcher das Plug-In an der Fräsmaschine entwickelt hat, sowie dem Leiter des Industrie 4.0 Collaboration Lab am KIT-IMI Herrn Dipl.-Kaufm. Michael Grethler und dem Geschäftsführer der EES Beratungsgesellschaft mbH Herrn Dipl.-Wirtsch.-Ing. Pascal Striebig, welcher die Big Data-Analytik IT-technisch umgesetzt hat.

Nicht zuletzt bei meiner Familie, welche mir die Zeit gaben, diese Arbeit umzusetzen.

Aufbau der Dissertation

Die Dissertation ist in einzelne Bereiche gegliedert, so dass die Abläufe getrennt betrachtet werden können.

Die Methodik stellt die Ableitungen und Korrelationen zwischen den Systemen und Prozessen dar (siehe [Abbildung 1](#)).

Damit die einzelnen Prozesse und Abläufe in sich geschlossen betrachtet werden können, sind die Abläufe in folgende Bereiche unterteilt:

- Betriebswirtschaftliche Abläufe
- Technische Abläufe
- Produktionstechnische Abläufe

Der Aufbau der Dissertation geht von der aktuellen / heutigen Situation aus (Stand der Technik). Die technischen Möglichkeiten wurden durch die Installation am KIT-IMI nachgewiesen, so dass die Effekte nachhaltig erzielt werden können. Hierbei sind bereits Anregungen in Softwareentwicklungen eingeflossen, welche in der Arbeit aufgeführt sind. Aufgrund der wissenschaftlichen Artikel sind Realisierungsanfragen vorhanden, welche voraussichtlich in eine technische Gesamtoptimierung mittels definierten Algorithmen einfließen werden.

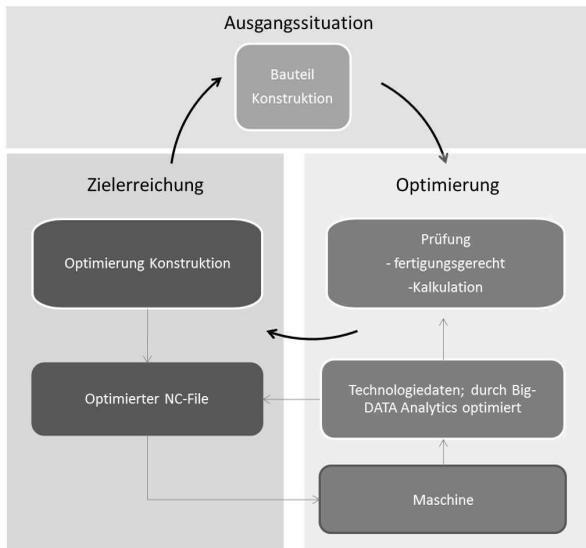


Abbildung 1: Dokumentaufbau anhand der Zielstellung

Damit die Methodik und die Effekte dargestellt werden, sind die Kapitel wie folgt untergliedert:

Kapitel 1	• Einleitung
Kapitel 2	• Ziele / Herausforderungen / Problemstellungen
Kapitel 3	• aktuelle Situation
Kapitel 4	• Konzept zur Optimierung / Methodik
Kapitel 5	• Realisierung / Validierung / Implementierung
Kapitel 6	• Ergebnisse / Zusammenfassung / Beiträge
Kapitel 7	• Verzeichnisse
Kapitel 8	• Anhang
Kapitel 9	• Erklärung

Formelzeichen

Formelerklärung inkl. Einheiten

Formelzeichen	Begriff	Einheit
α	Steigungswinkel	°
a_e	Eingriffsbreite	mm
a_p	Zustelltiefe	mm
b	Spanungsbreite	mm
b	Regressionskoeffizient	
c_v	Konstante der Schnittgeschwindigkeit v_c bei $T = 1$ min	
D	Bohrungsdurchmesser	mm
d / D	Werkzeugdurchmesser	mm
δ	Spitzenwinkel Bohrer	°
f	Vorschub	mm/U
f_B	Verfahrensfaktor Bohren	
F_c	Schnittkraft	N
F_{cmz}	mittlere Schnittkraft je Schneide	N
F_{cz}	Schnittkraft pro Schneide	N
F_f	Vorschubkraft	N
f_u	Vorschub	mm/U
f_z	Vorschub pro Zahn	mm/Zahn
$f_{z\ opt}$	Vorschub pro Zahn optimiert	mm/Zahn
h	Spanungsdicke	mm
h_m	mittlere Spanungsdicke	mm
i	Anzahl Bohrung, bzw. Anzahl Fräswege	
k	Standzeitkonstante	
k_c	spezifische Schnittkraft	N/mm ²
$k_{c1.1}$	Hauptwert der spez. Schnittkraft bei Spanungsquerschnitt $A=1\text{mm}^2$	N/mm ²
K_{EHOP}	Energiekosten während der Hauptzeit pro NC-Operation	€

Formelzeichen	Begriff	Einheit
$K_{E_{nOP}}$	Energiekosten während der Nebenzeit pro NC-Operation	€
$K_{E_{OPges}}$	Energiekosten während der Hauptzeit + Nebenzeit pro NC-Operation	€
K_F	Fertigungskosten	€
$K_{F_{NC}}$	Fertigungskosten NC-Bearbeitung	€/Stück
$K_{F_{NCA}}$	Fertigungskosten NC-Bearbeitung (Auszug)	€/Stück
K_f	Fixkosten	€
K_{fR}	Fixkosten-Rüstzeitanteil	€
K_y	Spanwinkelkorrektur	
K_i	Lager- und Zinskostensatz	€
K_L	Lagerkosten	€
$K_{M_{fix}}$	Maschinenstundensatz - Fixkosten	€/h
$K_{M_{fixOPges}}$	Fixkosten für Haupt- und Nebenzeit pro NC-Operation	€
K_{ML}	Maschinen- und Lohnkostensatz	€/h
K_{OP}	Gesamtkosten der NC-Operation	€
K_p	Energiekosten pro Kilowattstunde	€/h
K_{Pers}	Personal-Stundensatz	€/h
K_{PersOP}	Personalkosten für Haupt- und Nebenzeit pro NC-Operation	€
K_{SCH}	Schneidstoffkorrektur	
K_v	Schnittgeschwindigkeitskorrektur	
K_v	Korrekturfaktor aus Tabelle	
K_{ver}	Schneidstoffkorrektur	
K_{WCUT}	Werkzeugkosten pro Schneide (Kosten einer Werkzeugschneide)	€
K_{Wh}	Werkzeugverschleißkosten während der Hauptzeit	€
K_{WhOP}	Werkzeugverschleißkosten pro NC-Operation während der Hauptzeit	€
K_{WZ}	Werkzeugkosten	€
L	Bohrweg / Fräsweg	mm

Formelzeichen	Begriff	Einheit
M	Jahresbedarf	
m	Konstante zur spez. Schnittkraft	
m	Losgröße	
m_{opt}	Optimale Losgröße	
n	Anzahl Fertigungslose pro Jahr	
n	Drehzahl	U/min
η	Wirkungsgrad	
P_a	Antriebsleistung	KW
P_c	Schnittleistung	KW
P_{ges}	Leistung	KW
Q	Zeitspanvolumen	cm ³ /min
Q_{SP}	Volumen der ungeordneten Spanmenge	cm ³ /min
Q_W	abgetrenntes Werkstoffvolumen	cm ³ /min
r	Schneidenradius	mm
R	Spanraumzahl	
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
R_a	Rautiefe / arithmetischer Mittenrauwert	μm
R_t	Rautiefe maximal	μm
R_z	Rautiefe gemittelt	μm
T	Auftragszeit	min
T	Standzeit des Werkzeuges	min
T_n	Standzeit aktueller Datensatz	min
T_1	mittlere Standzeit	min
T_{ok}	kostenoptimale Standzeit	min
T_s	Standzeit pro Schneide	min
t_a	Ausführungszeit	min
t_e	Bearbeitungszeit	min
t_h	Hauptzeit	min
t_{hOP}	Hauptzeit pro NC-Operation	min
t_n	Nebenzeit	min

Formelzeichen	Begriff	Einheit
t_{nOP}	Nebenzeit pro NC-Operation	min
t_r	Rüstzeit	min
t_W	Werkzeugwechselzeit	min
v_c	Schnittgeschwindigkeit	mm/min
$v_{c\ opt}$	kostenoptimale Schnittgeschwindigkeit	mm/min
v_{c1}	mittlere Schnittgeschwindigkeit	mm/min
v_{cn}	Schnittgeschwindigkeit aktueller Datensatz	mm/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
Z	Anzahl Zähne	
Z_{ie}	im Eingriff befindliche Zähnezahl	
κ	Eingriffswinkel (Kappa)	°
π	Kreiszahl Pi = 3.14159265359	
φ_s	Schnittbogenwinkel	°

Tabelle 1: Formelzeichen

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG	17
2	ZIELE / HERAUSFORDERUNGEN / PROBLEMSTELLUNGEN	23
2.1	GENERELL	23
2.2	ZIELE	24
2.2.1	generell.....	24
2.2.2	Handlungsbedarf.....	26
2.2.3	Herausforderungen	26
2.2.4	Zukünftige Bedeutung von Kernthemen.....	26
2.2.5	Heutige Ziele - zusammengefasst.....	27
2.2.6	Zukünftige Ziele - zusammengefasst	28
2.2.7	Zusammenfassung	30
2.3	PROBLEMSTELLUNG.....	30
2.3.1	Generell	30
2.3.2	Technischer Ablauf.....	30
2.3.3	Betriebswirtschaftlicher Ablauf.....	35
2.3.4	Produktionstechnischer Ablauf.....	37
2.3.5	Zusammenfassung	43
3	AKTUELLE SITUATION VON PLM-, ERP- UND MES GEPRÄGTEN PROZESSEN	45
3.1	GENERELL	45
3.2	TECHNISCHER ABLAUF.....	46
3.2.1	Konstruktion	46
3.2.2	NC-Programmierung	47
3.2.3	NC-Simulation.....	48
3.3	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHE ABLÄUFE	49
3.4	PRODUKTIONSTECHNISCHE ABLÄUFE	49
3.4.1	MES-geprägter Prozess	49
3.4.2	Werkzeugtechnologie.....	52
3.5	VERTIKALE INTEGRATION	54
3.5.1	Maschinenanbindung.....	57
3.6	HORIZONTALE INTEGRATION	59
3.7	VERNETZUNG AUF BASIS INDUSTRIE 4.0.....	60
3.8	ZUSAMMENFASSUNG.....	61
4	KONZEPT ZUR OPTIMIERUNG / METHODIK	62
4.1	ALLGEMEIN	62
4.2	GESAMTKONZEPT	63
4.2.1	Vertikale Integration	64
4.2.2	Maschinenanbindungen.....	66
4.2.3	Horizontale Integration.....	68
4.2.4	Mensch im Mittelpunkt.....	70
4.3	INTEGRATIONEN	72
4.3.1	Service-basierende Integrationen.....	72
4.3.2	Integration von Service orientierter Architektur	72
4.3.3	Big Data-Integration verschiedener Datenquellen.....	73
4.4	TECHNISCHE ABLÄUFE	74
4.4.1	PLM-Integration	75
4.4.2	CAD-Analyse	77
4.4.3	NC-Programmierung	79
4.4.4	NC-Simulation.....	81
4.5	BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHER ABLAUF	84
4.5.1	ERP-Prozess	84
4.6	PRODUKTIONSTECHNISCHER ABLAUF	84
4.6.1	MES-Prozess	85

4.6.2	Werkzeugtechnologie.....	86
4.7	METHODIK ZUR UMSETZUNG ALLGEMEIN	88
4.8	GRUNDLAGEN DER KOSTENARTEN	88
4.8.1	Kostenart Maschinenkosten für Haupt- und Nebenzeit	89
4.8.2	Kostenart Personalkosten für Haupt- und Nebenzeit.....	89
4.8.3	Kostenart Werkzeugverschleißkosten für Hauptzeit	89
4.8.4	Kostenart Energiekosten für Haupt- und Nebenzeit.....	90
4.8.5	Gesamtkosten für Haupt- und Nebenzeit einer NC-Operation	90
4.8.6	Gesamtkosten (te) für eine komplette Bearbeitung.....	90
4.9	GRUNDLAGEN DER OPTIMIERUNG	90
4.9.1	Technologische Ermittlung	92
4.9.2	Kostenoptimale Standzeit pro NC-Operation	92
4.9.3	Kostenoptimale Schnittgeschwindigkeit pro NC-Operation	98
4.9.4	kostenoptimale Vorschubermittlung.....	98
4.9.5	Ermittlung Zeitspanvolumen pro NC-Operation.....	107
4.9.6	Ermittlung Hauptzeit (t_h)	108
4.9.7	Ermittlung Werkzeugkosten.....	108
4.9.8	Gesamtkosten	108
4.9.9	Zerspanbarkeit	110
4.9.10	Optimierungsmethodik.....	112
4.9.11	Ergebnisse der Werkzeugoptimierung	113
4.10	KENNZAHLEN	114
4.10.1	Produktions-Kennzahlen.....	114
4.10.2	Zeitermittlung-Kennzahlen (nach REFA).....	116
4.10.3	Technologie-Kennzahlen	117
4.10.4	Auswertungen nach Bereichen.....	118
4.11	OPTIMIERUNG AUFGRUND DATEN ANALYSE	119
4.11.1	Kostenermittlung.....	119
4.12	ZUSAMMENFASSUNG.....	121
5	REALISIERUNG / VALIDIERUNG.....	122
5.1	ABBILDUNG DER GESAMTPROZESSKETTE AM KIT -IMI	122
5.2	DATENFLUSS AM BEISPIEL VOM KIT-INDUSTRIE 4.0 COLLABORATION LAB.....	122
5.2.1	Workflow	123
5.2.2	Aufbau des Demonstrators.....	125
5.3	DETAILBERECHNUNG DER DATEN	126
5.3.1	Verarbeitung der Daten aus dem NC-Programm	128
5.3.2	Verarbeitung der Daten aus TDM	129
5.3.3	Verarbeitung der Daten aus dem ERP-System	129
5.3.4	Verarbeitung der Daten aus der Maschine	130
5.4	VALIDIERUNG - GRUNDZÜGE.....	131
5.5	VALIDIERUNG - BAUTEIL 1	131
5.5.1	Allgemeines	131
5.5.2	Stammdaten.....	132
5.5.3	Ermittlung der Standzeitkonstante zur Standzeitermittlung.....	133
5.5.4	Ermittlung der kostenoptimalen Standzeit.....	135
5.5.5	Ermittlung der kostenoptimalen Schnittgeschwindigkeit.....	135
5.5.6	Ermittlung der spezifischen Schnittkraft zur Vorschubermittlung.....	135
5.5.7	Ermittlung des Vorschubes.....	137
5.5.8	Korrekturen der ermittelten Werte	138
5.5.9	Zusammenfassung der technologisch optimierten Werte.....	139
5.5.10	Ermittlung des Zeitspanvolumen (Auszug)	140
5.5.11	Ermittlung der Hauptzeit (Auszug).....	140
5.5.12	Ermittlung der Werkzeugkosten.....	141
5.5.13	Ermittlung der Fertigungskosten, inkl. der Werkzeugkosten (Auszug).....	141
5.6	VALIDIERUNG - BAUTEIL 2	142
5.6.1	Allgemeines	142
5.6.2	Stammdaten.....	142
5.6.3	Ermittlung der Standzeitkonstanten zur Standzeitermittlung.....	144

5.6.4	<i>Ermittlung der kostenoptimalen Standzeit</i>	145
5.6.5	<i>Ermittlung der kostenoptimalen Schnittgeschwindigkeit</i>	145
5.6.6	<i>Ermittlung der spezifischen Schnittkraft zur Vorschubermittlung</i>	146
5.6.7	<i>Ermittlung des Vorschubes</i>	147
5.6.8	<i>Korrekturen der ermittelten Werte</i>	149
5.6.9	<i>Zusammenfassung der technologisch optimierten Werte</i>	150
5.6.10	<i>Ermittlung des Zeitspannvolumen (Auszug)</i>	150
5.6.11	<i>Ermittlung der Hauptzeit (Auszug)</i>	151
5.6.12	<i>Ermittlung der Werkzeugkosten</i>	151
5.6.13	<i>Ermittlung der Fertigungskosten, inkl. der Werkzeugkosten (Auszug)</i>	152
5.7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	153
6	ERGEBNISSE / ZUSAMMENFASSUNG / BEITRÄGE	154
6.1	ERGEBNISSE	154
6.1.1	<i>Bauteil 1</i>	154
6.1.2	<i>Bauteil 2</i>	155
6.1.3	<i>Visualisierung</i>	155
6.1.4	<i>Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	156
6.2	EFFEKTE	157
6.3	VERBESSERUNG DES PROZESS-ABLAUFES IM CAD/CAM-UMFELD	158
6.3.1	<i>Prozessverbesserungen auf technische Planungsebene</i>	158
6.3.2	<i>Optimierung des Konstruktionsprozesses</i>	158
6.3.3	<i>Optimierung des NC-Prozesses</i>	160
6.3.4	<i>Gesamtoptimierung</i>	160
6.4	ERWEITERTE DIGITALISIERUNG	161
6.4.1	<i>Digitaler Zwilling</i>	161
6.5	ZUSAMMENFASSUNG	162
6.5.1	<i>Ausblick</i>	164
6.5.2	<i>Neue Geschäftsmodelle</i>	168
6.6	SUMMARY	173
6.6.1	<i>Situation</i>	173
6.6.2	<i>Realization</i>	173
6.6.3	<i>Results</i>	173
6.7	BEITRÄGE	174
6.7.1	<i>Schlussfolgerungen</i>	174
6.7.2	<i>Wissenschaftliche Beiträge</i>	175
6.7.3	<i>Angewandte wissenschaftliche Beiträge</i>	176
6.7.4	<i>Anwendbar</i>	177
7	VERZEICHNISSE	178
7.1	LITERATURVERZEICHNIS	178
7.1.1	<i>Buchquellen</i>	178
7.1.2	<i>Presseinfo und Zeitschriften und Flyer</i>	183
7.1.3	<i>Internetquellen</i>	183
7.2	GLIEDERUNG DER BEITRÄGE / ARTIKEL	184
7.3	NORMEN	185
7.4	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	186
7.5	TABELLENVERZEICHNIS	189
7.6	BEGRIFFS- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	190
7.7	PRODUKTVERZEICHNIS / PARTNER AM KIT-IMI	192
7.8	GLOSSAR (AUSZUG)	193
8	ANHANG	195
8.1	CURRICULUM VITAE - LEBENSLAUF KÜRZFORM	195
8.2	LEHRVERANSTALTUNGEN	195
8.3	EHRENAMTLICHE TÄTIGKEIT	195
8.4	EIGENE VERÖFFENTLICHUNGEN (AUSZUG)	196
8.5	VORSTELLUNG DER LÖSUNG BEI KONGRESSEN UND FACHGEBUNDENEN VERANSTALTUNGEN (AUSZUG)	197
9	ERKLÄRUNG	198

1 Einleitung

Um die Prozesse zu optimieren ist es notwendig technische und betriebswirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen. Die horizontale Integration stellt die Optimierung über die Wertschöpfungskette dar und die vertikale Integration bildet hierzu die Basis. Somit sind Abläufe mit den u.a. Systemen und deren Nutzern zu integrieren.

- Betriebswirtschaftliche Abläufe
 - ERP
 - HR
- Technische Abläufe
 - PLM
 - CAD
 - CAM
 - DNC
- Produktionstechnische Abläufe
 - MES
 - Tool-Data-Management
 - Qualitätsdatenmanagement

Hierbei unterstützt die Initiative Industrie 4.0 den Prozess.

Im Papier der Umsetzungsstrategie Industrie 4.0 [UMS-1] wird dargestellt, welche Bereiche in produzierenden Unternehmen „Industrie 4.0-Themen“ betreffen, wie in [Abbildung 2](#) dargestellt.

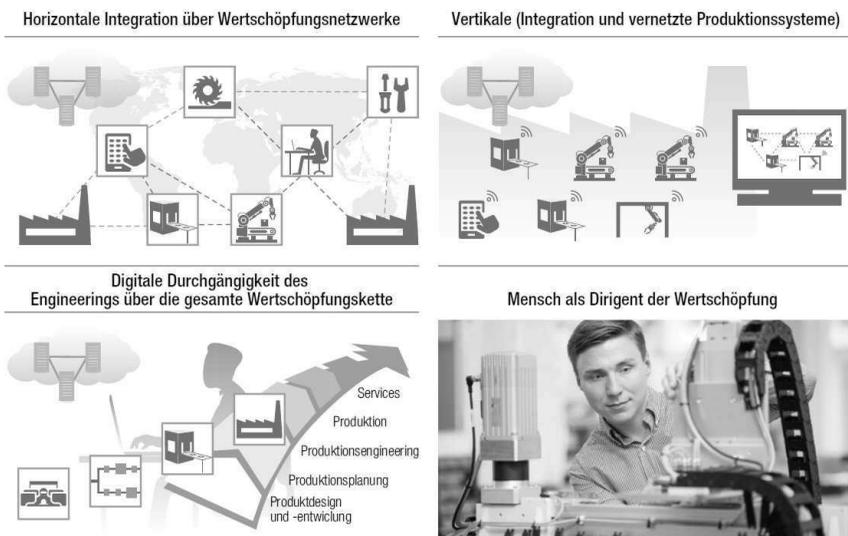


Abbildung 2: Aspekte von Industrie 4.0 in Anlehnung an die Umsetzungsstrategie

Hierbei werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Aspekt 1: horizontale Integration über Wertschöpfungsnetzwerke; dies beinhaltet u.a. die Vernetzung div. Abteilungen, Werke, Lieferanten und Kunden
- Aspekt 2: vertikale Integration, dies beinhaltet den Informationsaustausch innerhalb einer Fabrik; von der Maschine zur übergelagerten Unternehmensebene
- Aspekt 3: Durchgängigkeit des Engineerings, ebenso den Lebenszyklus eines Produktes
- Aspekt 4: Der Mensch als Dirigent in der Wertschöpfungskette, er kann aufgrund von Real-time-Daten aus der Maschine effektiv Entscheidungen treffen

Die Integrationen verbinden verschiedene Bereiche über die vertikale und horizontale Integration.

Die Arbeit stellt dar, wie durch Betriebsmittelinformationen ganzheitliche Prozesse optimiert werden, da aus technischer, als auch kommerzieller Sichtweise diese Daten überall benötigt werden. Hierzu werden in Echtzeit Daten aus dem Zerspanungsprozess ausgelesen, um diese über Big Data Analytik auszuwerten und optimiert der Planung für einen stetigen Verbesserungsprozess zur Verfügung zu stellen. Nachdem die Werkzeugkosten auf das Bauteil bezogen vernachlässigbar klein sind, können diese jedoch für die Gesamtprozesskette erhebliche Auswirkungen haben. Dies hat [MUECK-3] in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 3) vereinfacht dargestellt. Hier ist die Vernetzung der Bereiche ERP, PLM und MES dargestellt, wobei Werkzeuginformationen in allen Bereichen des Produktlebenszyklus von Bauteilen notwendig sind.

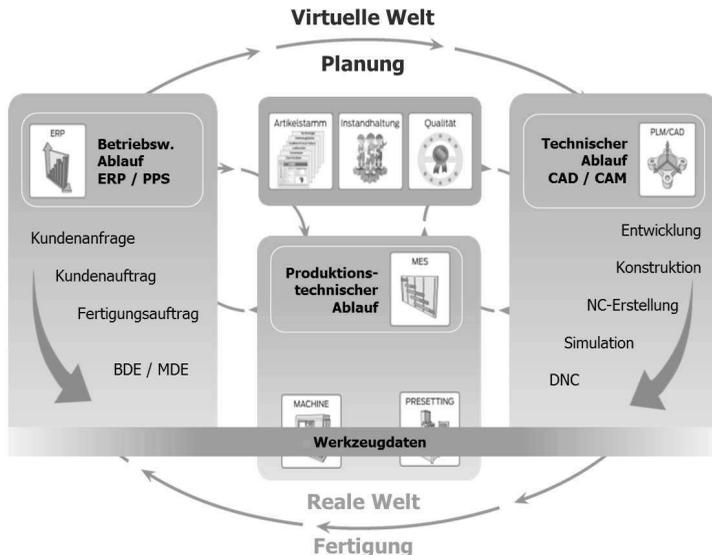


Abbildung 3: grundsätzlich notwendige Vernetzung der verschiedenen Bereiche in Anlehnung an Mücke

Durch die Integration ergeben sich neue Effekte, da somit an der Quelle (Entwicklung) die Bauteile fertigungsgerecht erstellt werden können, wodurch neue Einsparpotenziale vorhanden sind.

Dabei werden die ersten Effekte in der Entwicklung / Konstruktion erzielt. Die Konstruktion definiert im allg. Maschinenbau i.d.R. ca. 70% der Kosten eines Produktes. *Heimsoth* stellt dar, wie die Kosten eines Produktes mit zunehmender Zeit zunehmen [*HEIMS-1*]. Somit wird auch die Bedeutung der Konstruktion auf den Unternehmenserfolg deutlich, da Modifikationen in nachgelagerten Funktionsbereichen Änderungskosten mit sich ziehen. Hierbei erhöhen sich die Kosten potenziell zur Wertschöpfungskette, bzw. zum Wertschöpfungsfortschritt, wie in [Abbildung 4](#) ersichtlich ist.

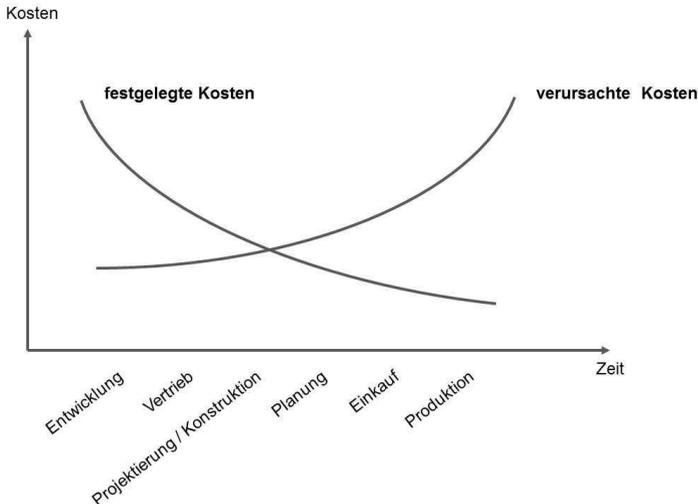


Abbildung 4: Festlegung der Produktkosten in Anlehnung an Heimsoth

Aufgrund der Optimierung in der Konstruktion und NC-Programmierung können die Zeiten in der Produktion reduziert werden.

Hierbei werden für die Methodik zur Optimierung die gängigen Zeitberechnungen nach *REFA* verwendet.

Aufgrund der Losgrößenberechnung im ERP-System über den MRPII-Lauf, ist es besonders bei kleinen Losgrößen notwendig, die Rüstzeiten zu reduzieren. Dies wird in der Methodik ebenfalls beachtet, um diese Kostennachteile zu berücksichtigen.

Hierzu werden die Vorgabezeitberechnungen auf Basis detaillierter Rüstzeiten, Hauptnutzungszeiten, Grundzeiten, etc. unterteilt, damit für die Vorkalkulation verbesserte Grundwerte bereitgestellt werden. Damit dies möglich ist, wird jede NC-Operation dem Auftrag, AVO, NC-Programm und dem technologischen Werkzeugeinsatz zugeordnet.

Auf dieser Basis werden optimale Prozess- und Technologieparameter für die Planung aus der Maschine über dementsprechende Historiendaten ermittelt, wobei somit Durchlaufzeiten, Rüstzeiten, Qualitätsdaten, Energiekosten, Werkzeugkosten und dementsprechende Zeitanteile zur Fertigung berücksichtigt werden.

Basierend auf der Technologiesdatenbank und den Informationen aus der Fertigung kann bereits in der Konstruktion bei einer diskreten Fertigung mittels einer 3D-Bauteilanalyse eine Vorkalkulation und der Arbeitsplan erstellt werden.