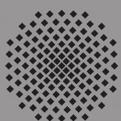
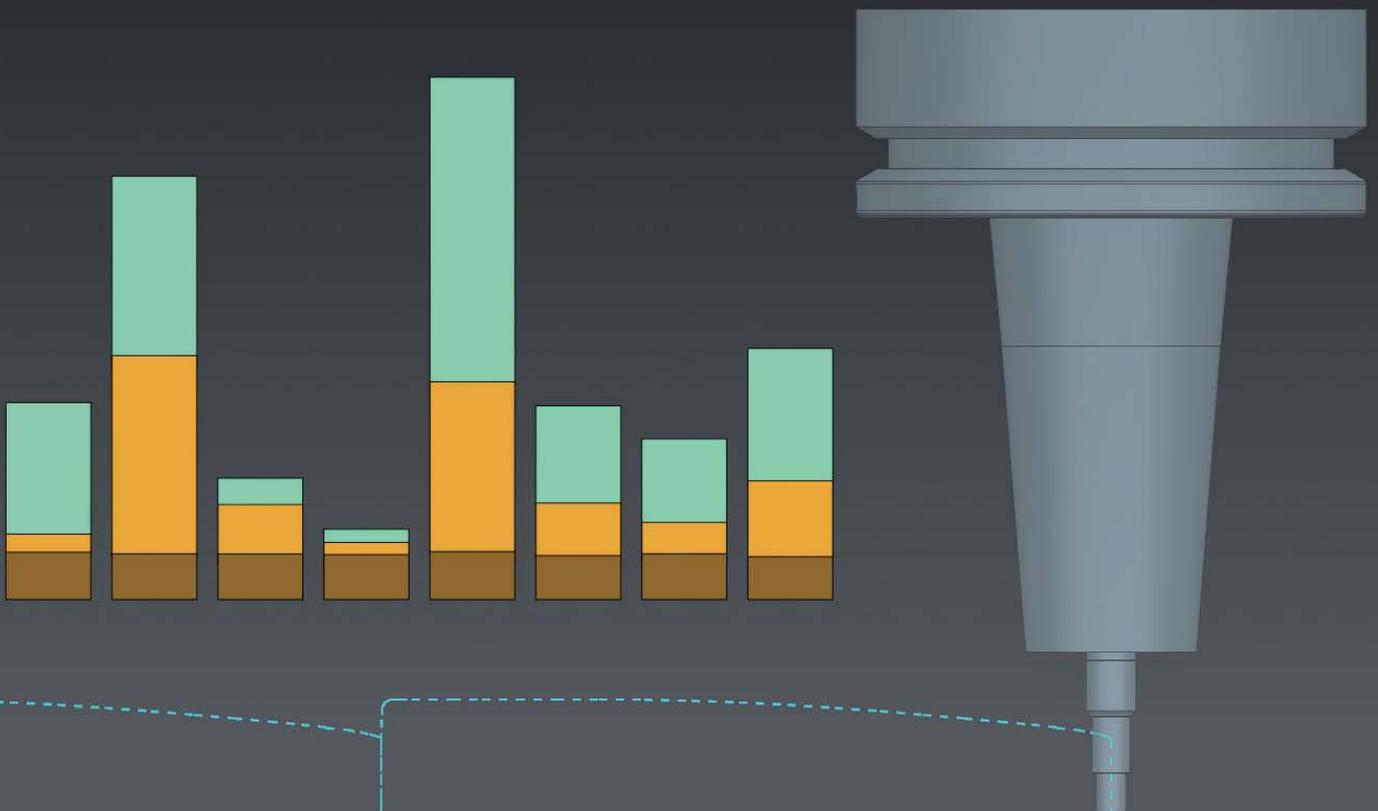


THOMAS BOSCH

**Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten
in der spanenden Fertigung**



STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG BAND 56

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

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

Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Thomas Bosch

**Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten
in der spanenden Fertigung**

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-00, Telefax 07 11 9 70-13 99
info@ipa.fraunhofer.de, www.ipa.fraunhofer.de

STUTTGARTER BEITRÄGE ZUR PRODUKTIONSFORSCHUNG**Herausgeber:**

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Alexander Verl
Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart
Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart
Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW)
der Universität Stuttgart

Titelbild: © Thomas Bosch

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISSN: 2195-2892

ISBN (Print): 978-3-8396-1093-0

D 93

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2016

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

GELEITWORT DER HERAUSGEBER

Produktionswissenschaftliche Forschungsfragen entstehen in der Regel im Anwendungszusammenhang, die Produktionsforschung ist also weitgehend erfahrungsbasiert. Der wissenschaftliche Anspruch der „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ liegt unter anderem darin, Dissertation für Dissertation ein übergreifendes ganzheitliches Theoriegebäude der Produktion zu erstellen.

Die Herausgeber dieser Dissertations-Reihe leiten gemeinsam das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und jeweils ein Institut der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik an der Universität Stuttgart.

Die von ihnen betreuten Dissertationen sind der marktorientierten Nachhaltigkeit verpflichtet, ihr Ansatz ist systemisch und interdisziplinär. Die Autoren bearbeiten anspruchsvolle Forschungsfragen im Spannungsfeld zwischen theoretischen Grundlagen und industrieller Anwendung.

Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ ersetzt die Reihen „IPA-IAO Forschung und Praxis“ (Hrsg. H.J. Warnecke / H.-J. Bullinger / E. Westkämper / D. Spath) bzw. ISW Forschung und Praxis (Hrsg. G. Stute / G. Pritschow / A. Verl). In den vergangenen Jahrzehnten sind darin über 800 Dissertationen erschienen.

Der Strukturwandel in den Industrien unseres Landes muss auch in der Forschung in einen globalen Zusammenhang gestellt werden. Der reine Fokus auf Erkenntnisgewinn ist zu eindimensional. Die „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ zielen also darauf ab, mittelfristig Lösungen für den Markt anzubieten. Daher konzentrieren sich die Stuttgarter produktionstechnischen Institute auf das Thema ganzheitliche Produktion in den Kernindustrien Deutschlands. Die leitende Forschungsfrage der Arbeiten ist: Wie können wir nachhaltig mit einem hohen Wertschöpfungsanteil in Deutschland für einen globalen Markt produzieren?

Wir wünschen den Autoren, dass ihre „Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung“ in der breiten Fachwelt als substanziell wahrgenommen werden und so die Produktionsforschung weltweit voranbringen.

Alexander Verl

Thomas Bauernhansl

Engelbert Westkämper

Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten in der spanenden Fertigung

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Thomas Bosch

aus Villingen-Schwenningen

Hauptberichter:	Prof. i. R. Dr.-Ing. Peter Klemm
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA

Tag der mündlichen Prüfung:	01. August 2016
-----------------------------	-----------------

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
(ISW)

der Universität Stuttgart

2016

Vorwort des Autors

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung „Maschinen-, Werkzeug- und Produktionssysteme“ in der „Technologiefabrik Powertrain“ der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Klemm, kommissarischer Leiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart, bedanke ich mich besonders für die Betreuung meiner Arbeit und die immer sehr konstruktiven Statusgespräche.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Weyrich, Leiter des Instituts für Automatisierungs- und Softwaretechnik der Universität Stuttgart, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Mathias Liewald MBA, Leiter des Instituts für Umformtechnik der Universität Stuttgart, danke ich für die Übernahme des Koreferats und die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Darüber hinaus gilt mein Dank Herrn Dr.-Ing. Wilfrid Polley, Leiter der Abteilung „Maschinen-, Werkzeug- und Produktionssysteme“, für die Möglichkeit, meine Dissertation bei der Daimler AG schreiben zu dürfen. Auch danke ich ihm für die konstruktiven Doktorandengespräche.

Herrn Dipl.-Ing. Steffen Schöll, Teamleiter und Betreuer, danke ich für die große Unterstützung und angenehme Arbeitsatmosphäre während meiner gesamten Tätigkeit.

Meinen Kollegen Dennis Köhler, Tobias Neumann, Axel Schlegel, Steffen Schollenberger, Hongqing Zhao und im Besonderen Jochen Heim danke ich für die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit. Auch danke ich allen weiteren Kollegen, welche mich während meiner Tätigkeit unterstützt haben.

Schließlich gilt auch mein großer Dank meinen Eltern und Freunden für die Unterstützung und das Verständnis während dieser Arbeit.

Stuttgart, im Januar 2016

Thomas Bosch

Kurzinhalt

Kostendruck und Ressourceneffizienz machen es notwendig, Fertigungsprozesse immer weiter zu optimieren. Ein probates Mittel ist dabei die Reduktion der so genannten technischen Nebenzeiten. Diese haben einen nicht unwesentlichen Anteil an der Hauptnutzungszeit von Werkzeugmaschinen und sind im Gegensatz zu den technischen Hauptzeiten nicht wertschöpfend. Viele Fertigungsprozesse weisen einen Anteil technischer Nebenzeiten auf, der knapp unter oder gar über dem der technischen Hauptzeiten liegt. Die Optimierung technischer Nebenzeiten stellt sich aber äußerst komplex dar. Computerized Numerical Controls (CNC) sind in ihrer Anwendung, Sprachsyntax und Parametrierung äußerst vielschichtig. Das notwendige Fachwissen, technische Nebenzeiten optimieren zu können, besitzen nur sehr wenige Personen. Um diesem Umstand entgegen zu treten, wurde die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten für die spanende Fertigung neu entwickelt. Dazu werden zuerst acht verschiedene Verfahren der Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten vorgestellt. Daran anknüpfend wird die eigentliche Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten behandelt. Sie gliedert sich in acht thematisch geordnete Gruppen, wobei der Fokus dieser Arbeit auf den drei wichtigsten Gruppen liegt. Sie beinhalten jeweils verschiedene Optimierungsverfahren. Diese werden dargestellt und miteinander verglichen. Außerdem erfolgt dabei auch eine Beschreibung spezifischer Vor- und Nachteile. Da ein Großteil der Verfahren für eine manuelle Anwendung zu komplex ist, wurden Computerprogramme entwickelt, welche Teile der Anwendung der Methode automatisieren und sie somit einfacher anwendbar machen. Um die Verfahren zur Potenzialanalyse und der Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten bewerten zu können, wurden diese an drei ausgewählten, realen Fertigungsprozessen der Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten angewendet. Gehobene beziehungsweise zu hebende Potenziale werden ausführlich dargestellt und erklärt. Die Bewertung der Potenzialanalyse- und Optimierungsverfahren erfolgt anhand der ermittelten Potenziale und ergänzender Bewertungskriterien.

Short summary

Economic pressures and the increasing importance of resource efficiency make the streamlining of production processes necessary. In this context, the reduction of non-productive times, i.e. of the part of machine tools' total run time which, contrary to productive times, does not create value, represents an important lever. The percentage of non-productive times of many modern production processes is just below or even above that of productive times. However, streamlining non-productive times is extremely complicated. Computerized Numerical Controls (CNC) are very comprehensive in terms of their usage, specification language and parameter settings. Only very few people possess the specialised knowledge required for streamlining non-productive times. In order to counter this situation, a new method to reduce non-productive times will be covered in this thesis. For this purpose eight different processes to analyse the potential of non-productive times will be presented first. Following on from that, the actual method for reducing non-productive times is introduced. It consists of eight groups organised by topic, each representing a different streamlining process. Three of these groups will be the focus of this thesis. The eight groups will be covered and compared to one another. At the same time specific benefits and disadvantages are also detailed. However, due to the complexity of manual operation of a large part of processes computer programmes have been developed to automate certain parts of usage and thus facilitating their use. In order to be able to assess both the processes for an analysis of potential and the method to reduce non-productive times these processes were applied to three selected, real production processes of high-volume production of automotive power-train components. Rising potentials, and/ or potentials to rise will be covered and explained in detail. The evaluation of the processes to analyse and reduce non-productive times will be conducted using both the potentials identified and additional assessment criteria.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	xiv
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung und Lösungsansatz	3
1.4 Vorgehensweise	4
2 Grundlagen und Stand der Forschung und Technik	6
2.1 Definition technischer Nebenzeiten	6
2.1.1 Beginn und Ende einer technischen Nebenzeit	8
2.1.2 Sinnvolle Betrachtungsschärfe einer technischen Nebenzeit	10
2.1.3 Eigene Definition	11
2.2 Grundlagen der Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten	12
2.2.1 Werkzeugmaschine und Peripherie	12
2.2.2 Bauteile und Werkzeuge	13
2.2.3 Computerized Numerical Control	15
2.2.4 NC-Programme	16
2.3 Stand der Forschung	17
2.3.1 NC-Code Optimizer des IFW, Universität Hannover	18
2.3.2 Veröffentlichung von R. Singh, u. a.	19
2.3.3 Arbeit von T. Kim	20
2.3.4 Arbeit von T. Schröder	21
2.4 Stand der Technik	22
2.4.1 Steuerungshersteller	22
2.4.2 Werkzeugmaschinenhersteller	23
2.4.3 Prozesseigner und Anwender	23
2.4.4 Dienstleister und Softwareanbieter	24
2.5 Fazit	25

3	Potenzialanalyse	26
3.1	Erfassung und Analyse durch Prozessbeobachtung	28
3.1.1	Visuelle Beobachtung	28
3.1.2	Diagnosefunktionen	29
3.1.3	Protokollierzyklen	30
3.1.4	Fernzugriff via OPC	32
3.1.5	Datenanalyse und -darstellung	33
3.2	Erfassung und Analyse anhand des NC-Programmarchivs	36
3.2.1	NC-Bearbeitungsprogramm	37
3.2.2	NC-Unterprogramme und -Zyklen	38
3.2.3	Steuerungsparametrierungsdatei	38
3.2.4	Datenanalyse und -darstellung	39
3.3	Erfassung und Analyse mit Hilfe einer CNC-Bearbeitungssimulation	40
3.3.1	CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern	41
3.3.2	CNC-Bearbeitungssimulation mit Hardware-in-the-Loop	42
3.3.3	CNC-Bearbeitungssimulation mit Software-in-the-Loop	43
3.3.4	Prozessdatenanalyse und -darstellung	43
3.4	Vergleichendes Beispiel	43
3.5	Erste Bewertung und Fazit	44
4	Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten	46
4.1	Programmierter Sicherheitsabstand	47
4.1.1	Einflussfaktoren auf den realen Abstand	49
4.1.2	Einflussfaktoren auf den programmierten Sicherheitsabstand	51
4.1.3	Bewertung und neuer Programmierstandard	52
4.2	Werkzeugbahn	53
4.2.1	Parallele Ausführung von NC-Befehlen	53
4.2.2	Idealbahn am Beispiel Bohren	54
4.2.3	Genauhalt, Bahnsteuerbetrieb und Positionierachsen	56
4.2.4	Vorausberechnete Bahn	57
4.2.5	Limitierte, unbestimmte Bahn	58
4.2.6	Genetische Algorithmen	59
4.2.7	Vergleich und Bewertung	61
4.3	Bearbeitungsreihenfolge	64
4.3.1	Vorzugsrichtung	65
4.3.2	Lösung eines Travelling Salesman-Problems	66
4.4	Weitere Themengebiete	68
4.4.1	Steuerungsparametrierung	68

4.4.2	Anforderungsgerechte Parametersatzanzahl	69
4.4.3	Hilfsfunktionen	70
4.4.4	Wartemarken und Kanalsynchronisation	72
4.4.5	NC-Satzvorlauf und Programmvorverarbeitung	73
4.5	Fazit	75
5	Integration in die Prozessplanung	76
5.1	Umsetzung der Integration	78
5.1.1	Beispiel 1: Potenzialanalyse anhand des NC-Programmarchivs	78
5.1.2	Beispiel 2: Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge	82
5.2	Fazit	85
6	Integration in das Fertigungssystem	86
6.1	Umsetzung der Integration	88
6.1.1	Beispiel 1: Potenzialanalyse mit Hilfe eines Webservice	88
6.1.2	Beispiel 2: Anwenderzyklen mit erweiterter HMI-Darstellung	90
6.2	Fazit	94
7	Validierung und Ergebnisse	95
7.1	Validierung	95
7.1.1	Beispiel 1: Schieber- und Ventilgehäuse	96
7.1.2	Beispiel 2: Kurbelgehäuse	98
7.1.3	Beispiel 3: Zylinderkopf	101
7.2	Ergebnisse	104
7.2.1	Bewertung der Potenzialanalyseverfahren	104
7.2.2	Bewertung der Optimierungsverfahren	105
8	Zusammenfassung und Ausblick	107
8.1	Zusammenfassung	107
8.2	Ausblick	109
9	Anhang	111
9.1	Verfügbarkeit von Programmierbefehlen	111
9.2	Dynamikwerte weiterer Werkzeugmaschinen	111
9.3	Berechnungen und Versuche zur Bewegungsdauer	112
9.4	NC-Programm eines genetischen Algorithmus	114
	Literaturverzeichnis	121

Abkürzungsverzeichnis

<i>a</i>	Beschleunigung
<i>B</i>	Breite der Störgeometrie
<i>H</i>	Höhe der Störgeometrie
<i>j</i>	Ruck (engl. jerk)
<i>s</i>	Weg
<i>t</i>	Zeit
<i>v</i>	Geschwindigkeit
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CNC	Computerized Numerical Control
DIN	Deutsches Institut für Normung
GAE	Gesamtanlageneffektivität
HIL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human Machine Interface
IP	Internetprotokoll
k _v -Faktor	Geschwindigkeitsverstärkungsfaktor
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
NC	Numerical Control
OPC	Object Linking and Embedding for Process Control
xiv	

REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
SIL	Software-in-the-Loop
sl	solutionline
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TPM	Total Productive Management
TPS	Toyota Produktionssystem
TSP	Travelling Salesman-Problem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VNCK	Virtual Numerical Control Kernel
WZW	Werkzeugwechsel
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Um dem Ziel eines optimalen Fertigungsprozesses näher zu kommen, müssen auch die kleinsten Schritte betrachtet werden. Denn jede noch so kleine Verschwendung kann letztlich in Summe dazu führen, dass ein Fertigungsprozess seine Wirtschaftlichkeit und damit auch seine Rechtfertigung verliert. In der heutigen Zeit sind die Wörter „Globalisierung“, „Kostendruck“ und „Ressourceneffizienz“ allgegenwärtig. Ungenutzte Potenziale im Fertigungsprozess können zu einer Verlagerung oder vollständigen Aufgabe der Produktion führen. Dies gilt insbesondere in der automobilen Großserienfertigung, wo vielfach Produktionsstandorte innerhalb des Unternehmens in direkter Konkurrenz zueinander stehen (vgl. Ruzic 2013). Auch steigende Energiekosten oder die Schaffung nationaler und internationaler Richtlinien rücken die Fertigungseffizienz in den Fokus des Produzenten (vgl. Brecher 2010). Deshalb ist heutzutage das Bestreben besonders groß, die Produktivität immer weiter zu steigern.

Jede noch so kleine Verbesserung des Fertigungstaktes kann über die gesamte Betriebsdauer zu großen Ausbringungssteigerungen und damit Kostensenkungen führen. Dies wird durch verschiedenste Ansätze versucht zu erreichen. Immer wieder tauchen dabei die Begriffe „Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP)“ und „Toyota Produktionssystem (TPS)“ auf. Das TPS und die davon abgeleiteten, firmenspezifischen Produktionssysteme haben im wesentlichen das Ziel, eine höchstmögliche Produktivität bei hoher Qualität und hoher Liefertreue gegenüber dem Kunden zu erreichen (vgl. Schäfer 2015, S.41). Die Eliminierung jeglicher Verschwendung in Produktionsprozessen gilt dabei als eines der wichtigsten Ziele. Hierbei unterscheiden die Produktionssysteme strikt in Wertschöpfung und Verschwendung. Das TPS unterteilt in „7 Arten der Verschwendung“: Überproduktion, überflüssige Bewegungen, Wartezeiten, Transporte, Überbearbeitung, hohe Materialbestände sowie Nacharbeit und Ausschuss (vgl. Schäfer 2015, S. 41ff). Gerade in vollautomatisierten Fertigungssystemen, in denen der Mensch gar nicht oder nur noch steuernd eingreifen kann, ist der optimale Einsatz von Fertigungssystemkomponenten und damit insbesondere der Werkzeugmaschinen von entscheidender Bedeutung.

Betrachtet man nur den Fertigungsprozess innerhalb einer Werkzeugmaschine und setzt die Grenzen der Betrachtung bei der Be- und Entladung des Werkstücks, so gewinnen zwei Arten der Verschwendung stark an Bedeutung: Überflüssige Bewegungen und Wartezeiten der Werkzeugmaschine machen einen wesentlichen Teil des Fertigungsprozesses aus. Vielfach ist direkt zu erkennen, dass diese überflüssig sind und damit keine Wertschöpfung generieren. Auch die anderen Arten der Verschwendung können von großer Bedeutung sein, gewinnen aber vielfach erst bei der Betrachtung des ganzen Fertigungssystems an Gewicht.

Mit dem Ziel, die Verschwendungen in einer Werkzeugmaschine zu reduzieren, werden verschiedenste Optimierungsansätze verfolgt. Prinzipiell könnten solche Verschwendungen auch durch die zum gewünschten Fertigungsprozess passende Werkzeugmaschine wesentlich reduziert werden. In den vergangenen Jahrzehnten wurde deshalb vermehrt auf den Einsatz von Transferstraßen gesetzt, da sie eine sehr hohe Produktivität versprechen (vgl. Weck 1998, S. 20). Doch mittlerweile ist eine klare Abkehr von diesem Weg zu erkennen. Die unflexiblen Transferstraßen werden vielfach durch universelle und standardisierte Bearbeitungszentren ersetzt, welche die Herstellung verschiedenster Bauteile auf einer Fertigungslinie ermöglichen (vgl. Mößmer 2007, S. 11). Allerdings sind damit wieder steigende Verschwendungen durch verminderte Anpassung des Fertigungsprozesses an das Bauteil möglich (vgl. Kapitel 2.2.1).

Zeitverschwendungen innerhalb des automatisierten, durch eine Computerized Numerical Control (CNC) gesteuerten Fertigungsprozesses einer Werkzeugmaschine werden gemeinhin mit dem Begriff „technische Nebenzeiten“ bezeichnet. Im Gegensatz hierzu stehen in einem Fertigungsprozess die „technischen Hauptzeiten“ - sie gelten allesamt als wertschöpfend. Nachfolgende Diagramme, welche die Anteile technischer Haupt- und Nebenzeiten an der Gesamttaktzeit ausgewählter Fertigungsprozesse zeigen, sollen die Bedeutung technischer Nebenzeiten nochmals explizit herausstellen.

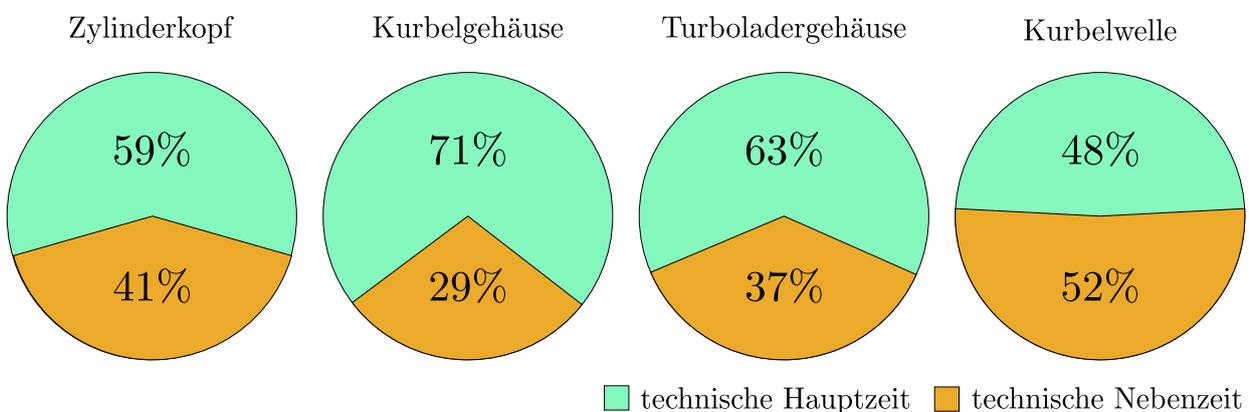


Abbildung 1.1: Anteile technischer Haupt- und Nebenzeiten ausgewählter Fertigungsprozesse - ermittelt mit den Verfahren der Potenzialanalyse

1.2 Problemstellung

Die in einem modernen Bearbeitungszentrum ablaufenden Prozesse sind hochkomplex und hochdynamisch. Durch die Verwendung neuer Maschinenkomponenten und CNCs wird es möglich, Fertigungsprozesse so schnell ablaufen zu lassen, dass eine Beobachtung und Analyse durch den Menschen ohne Hilfsmittel kaum mehr durchführbar ist. Die Chancen und Risiken bei der Verwendung einer modernen CNC liegen sehr dicht beieinander. Die Fülle an verfügbaren Funktionen ermöglicht es, genaue und dynamische Fertigungsprozesse auf verschiedene Weisen darzustellen. Doch gleichzeitig ist dieser Funktionsumfang von einer Person alleine kaum mehr beherrschbar. Daraus resultiert, dass die Reduktion von Verschwendungen innerhalb einer Werkzeugmaschine als zu schwierig und aufwendig gesehen wird. Oftmals kann nur mit dem Wissen von Experten gezeigt werden, welcher Stellhebel zur Produktivitätssteigerung durch die Reduktion technischer Nebenzeiten vorliegen kann. Dabei kommt es auch häufig zu Missverständnissen, da es nicht eindeutig definiert ist, welche Prozessschritte den technischen Nebenzeiten überhaupt zuzuordnen sind.

In den letzten Jahren wurden in der Industrie viele Ansätze zur Reduktion technischer Nebenzeiten durch Programmierung und Parametrierung der CNCs entwickelt und auch erfolgreich umgesetzt, jedoch zumeist von Experten, welche sich im jeweiligen Aufgabengebiet sehr gut auskannten. Gerade die sehr unterschiedlichen Gründe für das Auftreten einer technischen Nebenzeit und die daraus abzuleitenden Optimierungsmethoden machen es aber erforderlich, viele Aufgabengebiete gleichzeitig zu beherrschen. Dies kann im Allgemeinen von einer einzelnen Person aber kaum erfüllt werden. Die Komplexität solcher Optimierungsmethoden ist in ihrer Gesamtheit viel zu hoch. Hinzu kommt, dass die Effektivität einzelner Methoden sehr stark vom jeweiligen Fertigungsprozess abhängt. Eine sinnvolle Methodenwahl kann damit ohne eine vorherige Potenzialanalyse nicht erfolgen. Ein erzielter Erfolg nach einer Optimierung wäre eher zufällig.

1.3 Zielsetzung und Lösungsansatz

Aus der zuvor beschriebenen Problemstellung ergeben sich für diese Arbeit fünf wesentliche Ziele:

- Es soll eine eigene Definition technischer Nebenzeiten formuliert werden, welche sich zur Schaffung einer einheitlichen Diskussionsgrundlage eignet. Mit dieser Definition soll es möglich sein, Prozessschritte eindeutig in Wertschöpfung (technische Hauptzeit) und Zeitverschwendung (technische Nebenzeit) trennen zu können.

- Durch die Darstellung der zur Verfügung stehenden Erfassungs- und Analysemethoden technischer Nebenzeiten soll es möglich werden, Verschwendungen schnell und einfach erkennen und die Optimierungsmethoden richtig wählen zu können.
- Das dritte Ziel dieser Arbeit ist die Formulierung einer einheitlichen, die Programmierung einer Werkzeugmaschine betreffenden Optimierungsmethode, welche wesentliche Verfahren zur Reduktion technischer Nebenzeiten aufzeigt und auch neu entwickelte Verfahren behandelt. Die Aufgliederung dieser Methodenbausteine soll dabei strukturiert und klar erfolgen.
- Die Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten in der spanenden Fertigung darf nicht nur für einen Experten anwendbar sein. Vielmehr muss sie einfach und schnell einzusetzen sein. Dies kann aber nur durch eine Integration in die Prozessplanung und das Fertigungssystem erreicht werden.
- Letztlich ist es auch Ziel dieser Arbeit, die Optimierung technischer Nebenzeiten möglichst früh im Produktionslebenszyklus durchzuführen zu können, um so die gehobenen Potenziale voll zu nutzen. Hierfür wird die Methode beispielhaft an realen Fertigungsprozessen angewendet und auf durch den Anwendungszeitpunkt bedingte Unterschiede eingegangen.

1.4 Vorgehensweise

In Kapitel 2 wird eine eigene *Definition technischer Nebenzeiten* entwickelt, welche im Wesentlichen der Festlegung folgt, wie sie in der Industrie allgemein getroffen wurde. Dabei werden aber auch Details geklärt. Dazu gehören die Fragestellungen nach dem Beginn und dem Ende einer technischen Nebenzeit, wie auch deren sinnvolle Betrachtungsschärfe. Außerdem werden in diesem Kapitel die *Grundlagen* einer Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten erläutert und der aktuelle *Stand der Forschung* beschrieben, welcher die Forschungsergebnisse zur Optimierung technischer Nebenzeiten unter verschiedenen Voraussetzungen zeigt. Daran anknüpfend wird anhand vier definierter Gruppen ein aktueller *Stand der Technik* gegeben.

Das Kapitel 3 widmet sich der *Potenzialanalyse* zur Optimierung technischer Nebenzeiten. Dabei wird eine Übersicht der zur Verfügung stehenden Verfahren zur Erfassung technischer Nebenzeiten mittels Prozessbeobachtung, NC-Programmarchivanalyse und CNC-Bearbeitungssimulation gegeben. Daran anknüpfend werden Analyse- und Darstellungsverfahren behandelt.

Die neu entwickelte, eigentliche *Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten* wird in Kapitel 4 behandelt. Die Methode wird in acht getrennte Gruppen gegliedert, welche einzeln beschrieben werden. Dabei werden auch Verfahren aufgezeigt, die teilweise schon bekannt sind oder als Teil dieser Arbeit neu entwickelt wurden. Diese Methodenbausteine werden beschrieben, analysiert und auch bewertet. Der Fokus liegt dabei auf den drei Methodenbausteinen „programmierter Sicherheitsabstand“, „Werkzeugbahn“ und „Bearbeitungsreihenfolge“, die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs.

Mögliche Wege der *Integration in die Prozessplanung* werden in Kapitel 5 beschrieben und anhand zweier Beispiele verdeutlicht. Diese Integrationsbeispiele zeigen, wie Erfassungs- und Analyseverfahren sowie auch Optimierungsverfahren als assistierende Computerprogramme in der Prozessplanung umgesetzt werden können.

Das Kapitel 6 befasst sich mit der *Integration in das Fertigungssystem*. Auch hier wird mittels zweier Beispiele eine mögliche Integration von Erfassungs-, Analyse- und Optimierungsverfahren in die Computersysteme der Fertigung, wie zum Beispiel das Human Machine Interface einer CNC, gezeigt.

Die *Validierung und Bewertung* der zuvor beschriebenen Verfahren erfolgt in Kapitel 7. An drei realen Fertigungsprozessen der Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten wurde eine Potenzialanalyse und Optimierung technischer Nebenzeiten durchgeführt. Dies geschah auch mit Hilfe der Integrationsbeispiele aus den Kapiteln 6 und 7. Anschließend erfolgt eine Bewertung der einzelnen Methodenbausteine anhand verschiedener Kriterien.

Das Kapitel 8 gibt eine *Zusammenfassung* der gesamten Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten in der spanenden Fertigung und zeigt auch einen *Ausblick* auf zukünftige mögliche Entwicklungen der Analyse und Optimierbarkeit technischer Nebenzeiten.

Im *Anhang*, dem Kapitel 9, finden sich zu einzelnen Themen detailliertere Informationen, unter anderem ein Vergleich der Steuerungsfunktionalitäten verschiedener Hersteller und ein Genetischer Algorithmus zur Bestimmung der schnellsten Werkzeugbahn in Form eines NC-Programms.

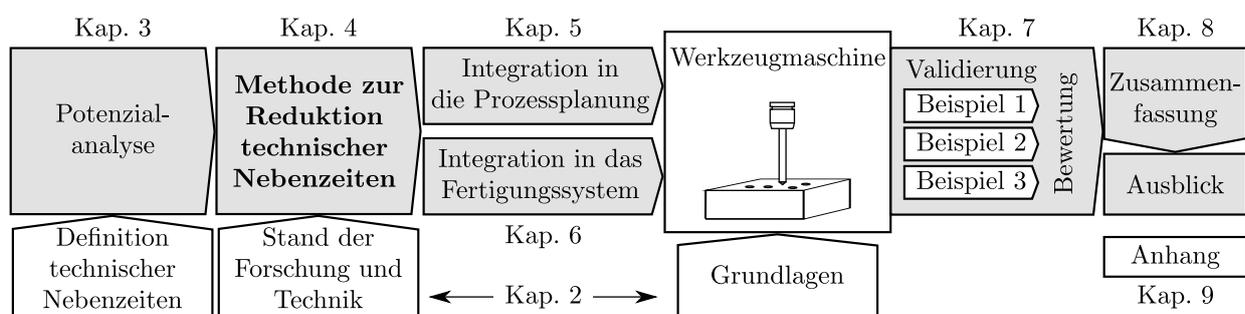


Abbildung 1.2: Vorgehensweise dieser Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Forschung und Technik

In diesem Kapitel sollen vier Themengebiete behandelt werden: die Definition technischer Nebenzeiten, die Grundlagen der Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten mit ihren Werkzeugmaschinen, CNCs, NC-Programmen, Bauteilen und Werkzeugen. Daran anknüpfend folgt der Stand der Forschung, welcher sich in Teilen direkt der Optimierung technischer Nebenzeiten widmet. Außerdem werden darin Lösungen aus Veröffentlichungen aufgezeigt, die sich in eine Optimierungsmethodik zur Reduktion technischer Nebenzeiten implementieren lassen könnten. Das letzte Themengebiet behandelt den aktuellen Stand der Technik zur Reduktion technischer Nebenzeiten. Dies geschieht anhand von vier Gruppen: Die Steuerungshersteller, die Werkzeugmaschinenhersteller, der Prozesseigner (Prozessverantwortliche) und Anwender sowie letztlich die Dienstleister und Softwareanbieter, welche anbieten, technische Nebenzeiten für den Prozesseigner zu optimieren.

2.1 Definition technischer Nebenzeiten

Die Definition technischer Nebenzeiten ist für den weiteren Verlauf dieser Arbeit sehr wichtig. Eine eindeutige Definition konnte in der Literatur aber nicht gefunden werden. Auch ist in Diskussionen im Unternehmensumfeld immer wieder festzustellen, dass diese unterschiedliche Definitionen des Begriffs „technische Nebenzeit“ zur Basis haben. Aber nur durch eine eindeutige Definition kann eine stabile Diskussionsgrundlage geschaffen werden, mit welcher es möglich wird, erfolgte Optimierungen eindeutig zu beschreiben und zu quantifizieren.

In der VDI-Richtlinie 3423 (VDI 2011) wird innerhalb des „Betrachtungszeitraumes“ von einer „Nutzungszeit“ gesprochen, jedoch wird dieser Begriff nicht weiter aufgesplittet. Im Sprachgebrauch des Total Productive Managements (TPM) werden zur Berechnung der Gesamtanlageneffektivität (GAE) zwar auch eine „Nettonutzungszeit“ und eine „Nettoproduktivzeit“ (Ben-Daya 2009, S. 22) herangezogen, jedoch werden auch diese nicht weiter aufgegliedert. Im Lexikon der Betriebsorganisation der REFA wird innerhalb der Nutzungszeit eines Betriebsmittels von einer Hauptnutzungszeit gesprochen (vgl. Abbil-

dung 2.1). Diese kennzeichnet die „planmäßige, unmittelbare Nutzung des Betriebsmittels zur Erfüllung der Aufgabe des Arbeitssystems“ (REFA 1993, S. 9). Jedoch findet auch hier keine weitere Unterscheidung in eine technische Haupt- oder Nebenzeit statt. Anhand dieser drei aufgeführten Begriffsdefinitionen kann folglich keine Aussage über das Verhältnis von technischen Haupt- und Nebenzeiten getroffen werden.

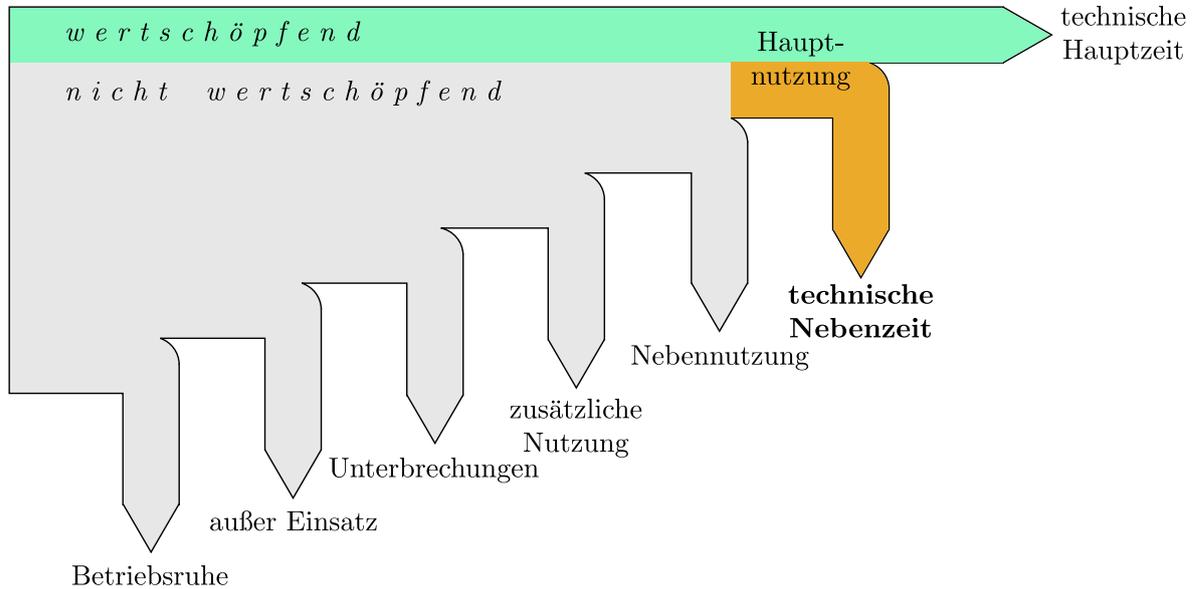


Abbildung 2.1: Nutzungszeiten nach REFA (REFA 1993, S. 9) und Erweiterung

Eine tiefer gehende Unterteilung hat Züst (1991) formuliert. Er unterteilt die „Loszeit“ in eine Rüstzeit, eine Verteilzeit, eine Haupt- und eine Nebenzeit. Hierbei definiert er die Hauptzeit als Zeitraum, in welchem sich die Werkzeugschneide im Eingriff befindet. Und dementsprechend definiert er die Nebenzeit als Zeitraum aktiver Auftragsbearbeitung, ohne, dass die Werkzeugschneide im Eingriff ist.

Im Industrieumfeld hat sich für technische Haupt- und Nebenzeiten eine sehr ähnliche Definition etabliert. So wird hier im Allgemeinen von einer technischen Hauptzeit gesprochen, wenn innerhalb des Automatikbetriebs der Werkzeugmaschine „ein Span fällt“. Und dem entsprechend wird von einer technischen Nebenzeit gesprochen, wenn während des Automatikbetriebs „kein Span fällt“. Die Definition der „Hauptnutzungszeit“ (REFA 1993, S. 9) wurde folglich in zwei Teile aufgegliedert. Jedoch ist solch eine Definition in vielerlei Hinsicht zu ungenau. Zuerst handelt es sich bei der Bearbeitung durch Werkzeugmaschinen nicht immer um einen spanerzeugenden Prozess - beispielsweise beim Gewindeformen. Des weiteren ist durch diese Definition nicht eindeutig geklärt, wann eine technische Nebenzeit beginnt und zu welchem Zeitpunkt sie endet. So könnte eine technische Nebenzeit bei realer Berührung des Werkstücks enden oder sobald die CNC der Werkzeugmaschine mit bearbeitungsspezifischer Vorschubgeschwindigkeit fährt. Auch trifft diese Definition keine Aussage über die Mindestdauer einer technischen Nebenzeit. So wäre es denkbar, dass es sich nur

um eine technische Nebenzeit handeln kann, wenn sie auch mit bloßem Auge zu beobachten ist und nicht, wenn sie nur wenige Millisekunden dauert. Diese Ungenauigkeiten werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert und bewertet. Schließlich wird eine eindeutige, eigene Definition geschaffen, welche als Grundlage für diese Arbeit dient.

2.1.1 Beginn und Ende einer technischen Nebenzeit

Wie schon zuvor beschrieben, hat es sich in der Industrie durchgesetzt, dass innerhalb der „Hauptnutzungszeit“ einer Werkzeugmaschine nur von einer technischen Haupt- oder Nebenzeit gesprochen werden kann. So ist es damit auch ersichtlich, dass es sich bei automatisierten Werkzeugwechseln, welche keine Wertschöpfung erzeugen, vollständig um technische Nebenzeiten handelt. Auch ein automatisierter Werkstückwechsel ist den technischen Nebenzeiten zuzurechnen, da dort die Werkzeugmaschine ihr Bauteil selbst ent- und wieder belädt oder solange warten muss, bis die Be- und Entladeeinrichtung den Werkstückwechsel vollzogen hat. Muss der Werkstückwechsel aber manuell erfolgen, so befindet sich die Werkzeugmaschine auch nicht im „Automatikmodus“ und damit auch nicht in einer „Hauptnutzungszeit“. Ein manueller Werkstückwechsel ist somit weder technische Neben- noch Hauptzeit - sondern eine „Nebennutzung“ (vgl. Abbildung 2.1).

Während des Einsatzes eines Werkzeugs erfolgt ein vielfacher Wechsel zwischen technischen Haupt- und Nebenzeiten. Der Beginn und das Ende einer technischen Nebenzeit muss eindeutig festgelegt sein. Jedoch kann die Unterscheidung nicht immer einfach vollzogen werden. Anhand der meistgenutzten Fertigungsverfahren bei der Herstellung automobilier Antriebsstrangkomponenten wird dieser Umstand verdeutlicht.

Die eindeutige Beschreibung des Beginns einer technischen Nebenzeit ist für die spätere Definition enorm wichtig. Prinzipiell könnte der Wechsel in eine technische Nebenzeit zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Die erste Möglichkeit, den Wechsel in eine technische Nebenzeit zu beschreiben, geht davon aus, dass die eigentliche Bearbeitung schon bei Beginn der Umkehrbewegung abgeschlossen ist. Im Falle eines Bohrers wäre die technische Hauptzeit schon bei Erreichen der programmierten Bohrungstiefe abgeschlossen. Im zweiten Fall setzt man voraus, dass die Bearbeitung erst abgeschlossen ist, wenn das Werkzeug die Bearbeitungsstelle verlassen hat. Ein Bohrer müsste demnach erst die Bohrung wieder komplett verlassen haben, damit eine technische Nebenzeit beginnen kann.

Da beim Bohren das Verlassen der Bohrung zumeist im Eilgang erfolgt, kann hierbei leicht von einer technischen Nebenzeit ausgegangen werden, während beispielsweise beim Reiben die Entscheidung für eine der beiden Sichtweisen deutlich schwerer fällt. So ist die eigentliche Bearbeitung bei Erreichen der Umkehrbewegung zwar schon abgeschlossen, jedoch kann die Reibahle häufig nicht im Eilgang aus der Bohrung entfernt werden, da

es sonst zur Beschädigung der Oberfläche kommen würde. Sie sollte stattdessen mit einer definierten Rückzugsgeschwindigkeit bewegt werden (vgl. DIN 1983, S. 6).

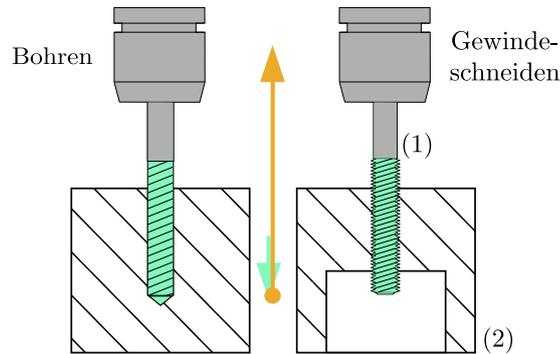


Abbildung 2.2: Exemplarische Darstellung des Beginns einer technischen Nebenzeit

Folgt man der Maßgabe, dass es sich nur dann um eine technische Hauptzeit handelt, wenn die eigentliche, wertschöpfende Bearbeitung stattfindet, so ist jede Rückzugbewegung auch eine technische Nebenzeit. Dies gilt auch exemplarisch für das Gewindeschneiden in Abbildung 2.2, bei welchem die Rückzugbewegung des Werkzeugs (1) zwar dem Gewindegang des Werkstücks (2) folgen muss, jedoch mit wesentlich höherer Drehzahl gegenüber dem Hereinfahren erfolgen kann.

Auch eine eindeutige Festlegung des Endes einer technischen Nebenzeit ist für eine grundlegende Definition unerlässlich. Der Wechsel in eine technische Hauptzeit könnte je nach Betrachtungsweise zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten geschehen: Die erste Möglichkeit geht davon aus, dass der Wechsel in eine technische Hauptzeit erfolgt, sobald die Ausführung der Eilgangbewegung in der CNC abgeschlossen ist und daran anschließend mit Vorschubgeschwindigkeit weiter gefahren wird. Die zweite Möglichkeit, das Ende einer technischen Nebenzeit zu beschreiben, geht von der realen Werkstückberührung durch das Werkzeug aus.

Die erste Betrachtungsweise böte den großen Vorteil, dass anhand der Ausführungszeiten einzelner NC-Sätze sehr leicht auf die technischen Haupt- und Nebenzeiten geschlossen werden könnte (vgl. Kapitel 3.1.4). Jedoch gibt es auch einen entscheidenden Nachteil der Betrachtungsweise, wenn die technische Hauptzeit beim Wechsel in einen Vorschubsatz beginnen sollte. So würde eine Verkürzung einer Vorschubbewegung dazu führen, dass die Eilgangbewegung sich verlängert und die technische Nebenzeit damit steigt. Dies wäre zum Beispiel bei der Minimierung des programmierten Sicherheitsabstandes zwischen Werkzeug und Werkstück der Fall (vgl. Kapitel 4.1). Das Ziel einer solcher Optimierung ist aber die Verkürzung der technischen Nebenzeit und damit der Gesamttaktzeit. Dies würde folglich zu einem Widerspruch führen.

Erfolgt der Wechsel in eine technische Hauptzeit erst, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, bei realer Berührung des Werkstücks (2) durch das Werkzeug (1), so hat eine Verringerung des programmierten Sicherheitsabstandes zwischen Bauteil und Werkzeug nur Einfluss auf die technische Nebenzeit. Die technische Hauptzeit bliebe davon unberührt, da schließlich der eigentliche, wertschöpfende Bearbeitungsprozess auch nicht beeinflusst würde. Nachteilig an dieser Definition ist nur, dass die Erfassung eines Wechsels von technischer Neben- zu Hauptzeit im NC-Programm nicht direkt möglich ist, sondern hierzu die Zuhilfenahme eines weiteren technischen Systems notwendig wird (vgl. Kapitel 3.1.2).

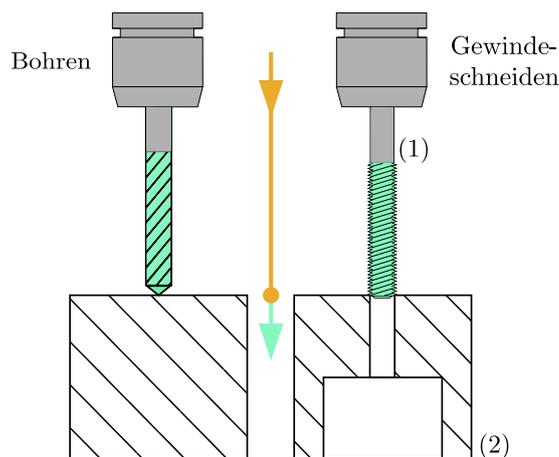


Abbildung 2.3: Exemplarische Darstellung des Endes einer technischen Nebenzeit

2.1.2 Sinnvolle Betrachtungsschärfe einer technischen Nebenzeit

Die Frage nach einer sinnvollen Betrachtungsschärfe für technische Nebenzeiten richtet sich vor allem nach der Überlegung, ob eine technische Nebenzeit immer aufgezeichnet werden kann oder gar visuell beobachtbar ist. Viele technische Nebenzeiten dauern aber nur wenige Millisekunden (vgl. Tabelle 2.1) und sind durch eine visuelle Prozessbeobachtung nicht erkennbar. Auch die Aufzeichnung mit Hilfe von weiteren technischen Systemen (vgl. Kapitel 3) ist in ihrer Auflösung unterschiedlich begrenzt. So liegt die Herstellervorgabe einer Siemens Sinumerik 840D sl bei einem Fernzugriff via OPC (vgl. Kapitel 3.1.4) für eine minimale Aktualisierungsrate bei hundert Millisekunden (vgl. Siemens 2000b, S. 18). Tritt aber eine gleiche technische Nebenzeit mehrmals auf, welche auf Grund ihrer sehr kurzen Dauer einzeln so nicht direkt erkennbar wäre, kann sie aber in Summe zu einer bedeutenden technischen Nebenzeit führen. Umgekehrt kann die minimale Ausführungsdauer eines NC-Befehls, auch „Satzwechselzeit“ genannt, durch „leistungsstarke Prozessoren im CNC-Kern oder einfache NC-Befehle“ (Schröder 2007, S. 32) nur wenige Millisekunden betragen. Auf diese Satzwechselzeit haben individuell festlegbare Systemtakte in der CNC maßgeblichen Einfluss (vgl. Siemens 2010b, S. 24ff; Kapitel 4.4.1).

Tabelle 2.1: Beispiele gemessener Ausführungszeiten verschiedener NC-Befehle an einer Werkzeugmaschine mit Siemens Sinumerik 840D

Beschreibung	NC-Befehl	Dauer
Vorpositionieren im Eilgang	Z=IC(1)	36 ms
Spindel einschalten	M3 S2000	64 ms
Warten am Bohrgrund (S2000)	G4 S3	9 ms
Satzvorlaufstopp zw. Bewegungen	STOPRE	152 ms
Ausschalten des Kühlschmiermittels	M=QU(9)	164 ms

Die sinnvolle Betrachtungsschärfe einer technischen Nebenzeit sollte deshalb der durch die CNC bestimmten Satzwechselzeit entsprechen. Denn auch die Optimierung einzelner kleinster technischer Nebenzeiten kann in Summe zu einem deutlichen Effekt führen. Läge die Betrachtungsschärfe bei hundert Millisekunden, so müsste der Effekt einer Optimierung sehr kleiner technischer Nebenzeiten null betragen. Eine sofortige Erfassung mit einigen technischen Systemen ist damit nur in Summe der gesamten Optimierung möglich, durch andere technische Systeme kann jedoch eine einzelne Optimierung direkt erkennbar werden (vgl. Kapitel 3.1).

2.1.3 Eigene Definition

Aus den zuvor erfolgten Betrachtungen kann nun folgende eigene Definition getroffen werden. Sie gilt für die weiteren Verlauf dieser Arbeit und soll auch als Basis weiterer Optimierungen in der Industrie dienen:

Eine technische Nebenzeit beschreibt eine nicht wertschöpfende Zeitspanne innerhalb der durch die REFA definierten „Hauptnutzungszeit“ (REFA 1993, S. 9), zu welcher das eingesetzte Werkzeug keine gewollte Formänderung am Werkstück erzeugt. Sie beginnt mit der Rückzugbewegung nach Abschluss der eigentlichen, wertschöpfenden Bearbeitung, endet bei erneuter Werkstückberührung durch das Werkzeug und dauert mindestens eine durch die CNC bestimmte Satzwechselzeit.

Die Begriffe Haupt- und Nebenzeit sollten dabei immer um das Adjektiv „technisch“ ergänzt werden, da sonst eine klare Abgrenzung zur „Nebennutzung“ (REFA 1993, S. 9) nicht gegeben wäre. Den Zeiten der Nebennutzung sollte der Begriff „organisatorische Nebenzeiten“ zugewiesen werden, um diese klar von den technischen Nebenzeiten zu trennen.

2.2 Grundlagen der Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten

Die Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten, englisch auch als „Powertrain“ bezeichnet, stellt einen exemplarischen Fall einer hochtechnisierten und weitgehend automatisierten Großserienfertigung dar. Vielfach besteht dabei ein modernes Fertigungssystem aus einzelnen Werkzeugmaschinen, welche miteinander über vollautomatisierte Be-/ Entladeeinrichtungen und Transportsysteme verbunden sind. Bis auf Wartung und Störungsbeseitigung finden sich fast keine Prozesse mehr, welche den Eingriff eines Menschen erfordern. Die Werkzeugmaschinen arbeiten in ihrem „Automatikbetrieb“ das geforderte Produktionsprogramm durchgängig ab. Dies erfolgt zumeist über drei Schichten und damit durchgehend. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Grundlagen und die Besonderheiten aufgezeigt, die solch eine Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten bestimmen. Die im weiteren Verlauf aufgezeigten Methoden zur Analyse und Optimierung technischer Nebenzeiten sollen aber nicht nur auf diesen Typ eines Fertigungssystems anwendbar sein, sondern verstehen sich auch als grundlegender, exemplarischer Anwendungsfall.

2.2.1 Werkzeugmaschine und Peripherie

In den vergangenen Jahren war ein klarer Trend zu größerer Flexibilität in der Fertigung der gesamten Automobilindustrie zu erkennen (vgl. AMB 2014), dieser Trend wird sich auch zukünftig fortsetzen. Individuell konfigurierte Sondermaschinen oder Transferstraßen werden kaum mehr eingesetzt. Dagegen versprechen rekonfigurierbare, modular aufgebaute Transferzentren bei hoher Wandlungsfähigkeit niedrige technische Nebenzeiten und damit eine hohe Effizienz (vgl. Heisel 2014). Weiterhin bieten universelle, standardisierte Bearbeitungszentren eine noch größere Flexibilität (vgl. Weck 1998, S. 20). Aus der Prämisse, mit diesen Maschinen möglichst viele verschiedene Bearbeitungen erfüllen zu können, resultiert aber auch, dass der Anteil technischer Nebenzeiten an der gesamten Fertigungszeit deutlich zunimmt. Denn die Universalbearbeitungszentren sind nicht mehr, wie zuvor die Sondermaschinen oder Transferstraßen, auf einen expliziten Fertigungsprozess ausgelegt (vgl. Bahmann 2013, S. 129f). Die neuen Generationen von Bearbeitungszentren sind modular aufgebaut und können so schnell umgebaut oder erweitert werden. So nennt die GROB-Werke GmbH & Co. KG in ihrem Produktportfolio als Grund für diese Entwicklung: „Innovationszyklen werden immer kürzer und Produktwechsel, speziell in der Automobilindustrie, müssen in kürzester Zeit umgesetzt werden“ (GROB-Werke 2015).

Um auch größere Bauteile auf der gleichen Werkzeugmaschine fertigen zu können, wurden die Arbeitsräume in der Maschine entsprechend vergrößert. Dadurch steigen aber auch

die Wege, welche die Maschinenachsen zurücklegen müssen, um zum Beispiel zwischen zwei Bearbeitungen einen Werkzeugwechsel durchführen zu können. Die Werkzeugmaschinen verfügen zumeist nur noch über eine einzelne Spindel, welche den gesamten Bearbeitungsumfang abdecken und auch sehr große Werkzeuge aufnehmen können muss. Hinzu kommt, dass durch die Zusammenfassung vieler verschiedener Bearbeitungen in einem Fertigungsprozess die Anzahl der eingesetzten Werkzeuge und damit auch die Zahl der Werkzeugwechsel zunimmt.

Gerade wohl auch deshalb verfügen moderne Werkzeugmaschinen über die Technik, hochdynamisch agieren zu können. Die Verwendung von getriebelosen Linearantrieben erlaubt es, Bewegungen „hoher Regelgüte mit großem k_v -Faktor“ (Schiffler 2011) durchzuführen, welche die Erdbeschleunigung weit übertreffen (vgl. Tabelle 9.2). Neue Dämpfungskonzepte an der Spindel ermöglichen es, die Schnitttiefe beim Fräsen deutlich zu steigern (vgl. Brecher 2015). Durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, wie kohlefaserverstärktem Kunststoff oder Betonschaum, kann die Masse einzelner Komponenten weiter reduziert und die Dynamik der gesamten Maschine gesteigert werden (vgl. Trumpf 2015; Hirsch und Hellmich 2012, S. 424). Werkzeugmaschinen mit spezieller Kinematik führen zu einer höheren Dynamik (vgl. Hüller Hille 2004). Auch die Entwicklung komplexer Werkzeugwechselsysteme erlaubt es, das Werkzeug in der Spindel in weniger als einer Sekunde zu tauschen (vgl. CHIRON-Werke 2015; Abele u.a. 2011; Abele u.a. 2012). So können viele verschiedene Bearbeitungen in einer Werkzeugmaschine wirtschaftlich zusammengefasst werden (vgl. Kapitel 2.4.2).

2.2.2 Bauteile und Werkzeuge

Für die Herstellung eines kompletten Antriebsstrangs müssen eine Vielzahl verschiedener Bauteile gefertigt werden. Typische Bauteile, welche in sehr großen Stückzahlen produziert werden, stellen der Zylinderkopf und das Kurbelgehäuse als Komponenten des Verbrennungsmotors und das Schiebergehäuse als Teil des Automatikgetriebes dar. Sie sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Charakteristisch für diese Bauteile ist eine komplexe Geometrie mit einem großen Umfang an Bearbeitungen (vgl. Weyrich u.a. 2004). Bei einem Großteil davon handelt es sich um eindimensionale oder zweidimensionale Bearbeitungsschritte, wie Bohren oder Planfräsen (2½D-Bearbeitung). Eine fünfachsigige Bearbeitung (3D-Bearbeitung) ist hier nur in Ausnahmefällen zu finden. Viele der Bauteile sind heutzutage aus Leichtmetallen, wie zum Beispiel Aluminiumlegierungen, gefertigt, welche sich meist sehr gut zerspanen lassen. Daraus resultieren sehr hohe Zeitspanvolumina und große Vorschubgeschwindigkeiten, was letztendlich zu sinkenden technischen Hauptzeiten führt. Dies bedingt aber auch, dass so der Anteil technischer Nebenzeiten an der Gesamttaktzeit weiter steigen wird. Auch

die deutlichen Verbesserungen bei den Werkzeugen tragen dazu bei, dass die Bearbeitungen immer weniger Zeit in Anspruch nehmen und so die technischen Nebenzeiten weiter an Bedeutung gewinnen. So gab es in den letzten Jahren eine Vielzahl an Optimierungen bei der Schneidengeometrie, beim Schneidenwerkstoff und bei der Bearbeitungsstrategie (vgl. Hoffmann 2015). Aber auch neue Kombinationswerkzeuge, welche zum Beispiel bohren und rückseitig anfasen können (vgl. Bauer 2011), wurden entwickelt.

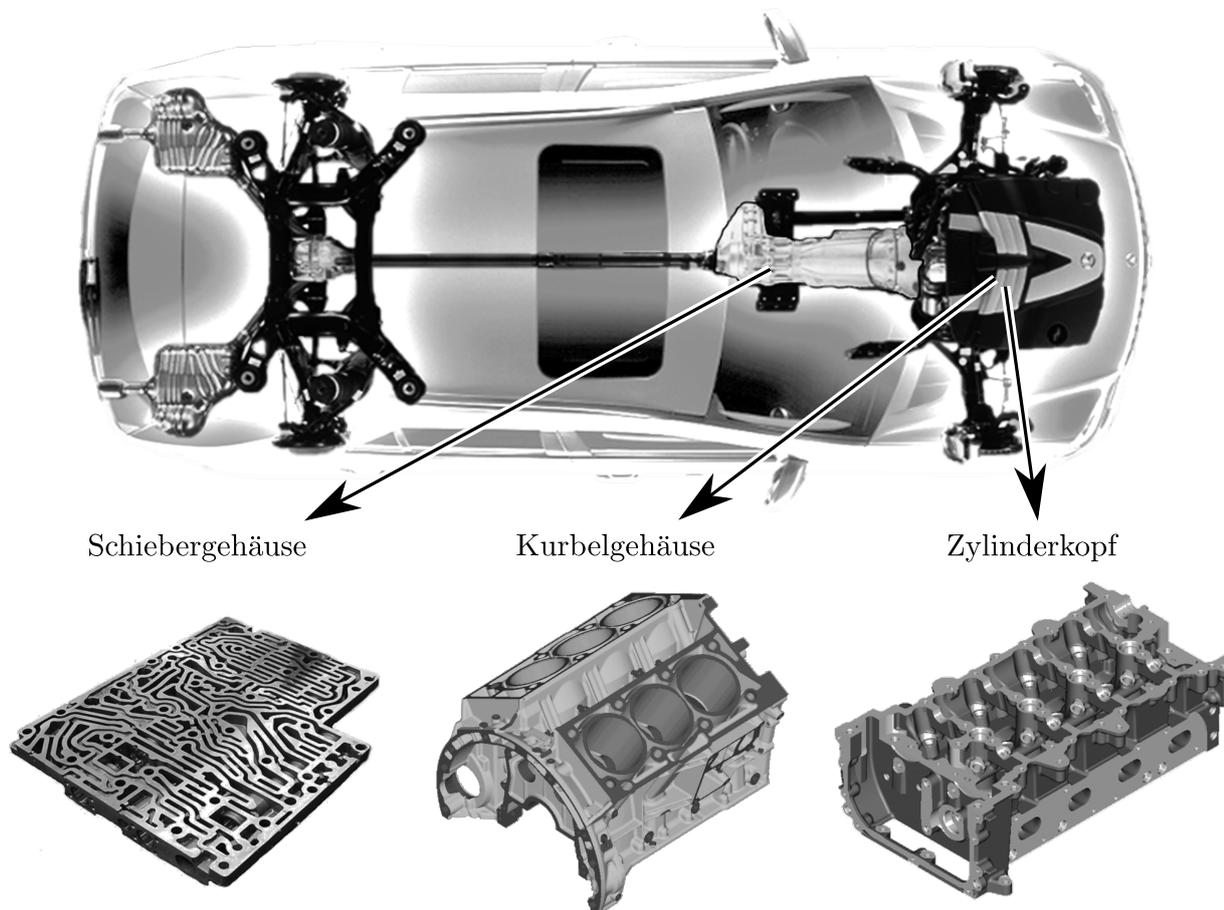


Abbildung 2.4: Auswahl typischer Bauteile in der Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten (Daimler AG)

Charakteristisch an den Werkzeugen für die Großserienfertigung von Antriebsstrangkomponenten ist, dass es sich im fast immer um Sonderanfertigungen handelt (vgl. Abbildung 2.5). Die Kombination mehrerer Bearbeitungsschritte in einem Werkzeug verspricht eine bessere Qualität in der Bearbeitung durch nur einmaliges Positionieren der Spindel, gleichzeitig geht damit auch eine Reduktion der technischen Nebenzeiten durch das Entfallen von zusätzlichen Werkzeugwechseln und Anfahrbewegungen im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine einher (vgl. Karpuschewski u.a. 2011). Dies kann so weit gehen, dass fünf oder mehr Bearbeitungsschritte mit einem Werkzeug zusammengefasst werden. Dem Ziel, möglichst wenige Werkzeuge einzusetzen, steht aber oftmals entgegen, dass für eine einzelne, spezielle Bearbeitung zusätzliche Werkzeuge eingesetzt werden müssen. Dies kann

durch ein besonderes Bearbeitungsverfahren oder auch nur durch einen außergewöhnlichen Bohrungsdurchmesser verursacht sein. Resultat ist dann oftmals ein sehr kurzer Werkzeugeinsatz, mit welchem ein großer Anteil technischer Nebenzeiten einher geht - verursacht durch Werkzeugwechsel und Anfahrbewegung.

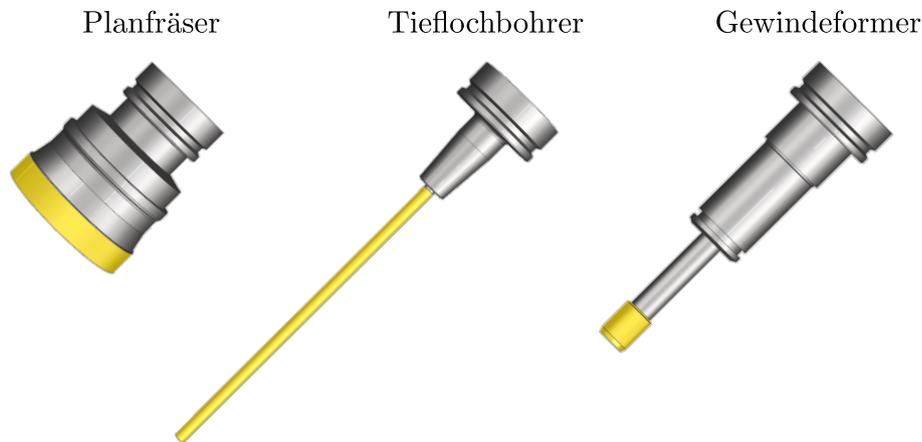


Abbildung 2.5: Auswahl typischer Werkzeuge in der Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten (Schneiden in gelb dargestellt; Daimler AG)

2.2.3 Computerized Numerical Control

Die Wahl der richtigen CNC stellt den Prozesseigner bei gleicher technischer Eignung im Allgemeinen vor ein Dilemma: Einerseits möchte er für alle Fertigungssysteme möglichst die gleiche CNC verwenden, da der Anwender im Fertigungssystem dann nur Bedienkenntnisse für ein CNC-System haben muss. Durch die sehr unterschiedlichen Bedienoberflächen und die differierenden NC-Sprachen (vgl. Kapitel 2.2.4) stellt die Benutzung eines weiteren CNC-Systems einen deutlich höheren Einarbeitungsaufwand für den Anwender dar. Andererseits ist es natürlich nicht sinnvoll, ein Produkt eines einzigen Hersteller zu beziehen. Bei der Wahl des CNC-Systems sollte deshalb als Beschaffungsstrategie zumindest der Ansatz des „dual sourcings“ verfolgt werden (vgl. Wannewetsch 2004, S. 60).

Zugleich ist man als Prozesseigner aber niemals frei in der Wahl des CNC-Systems, da die zur Verfügung stehenden CNC-Produkte als Teil der Werkzeugmaschine vom Maschinenhersteller bestimmt werden. Die zum aktuellen Zeitpunkt in der automobilen Großserienfertigung gebräuchlichsten CNC-Systeme sind die Siemens Sinumerik 840D solutionline, die Bosch Rexroth MTX und die Fanuc CNC 30i-PB. Die Steuerungshersteller verfolgen selbst unterschiedliche Strategien im Funktionsumfang ihrer Produkte. Welchen Einfluss der Funktionsumfang und die Programmiersprache der NC-Programme im Besonderen auf technische Nebenzeiten haben, wird in Kapitel 2.4.1 näher erläutert.

2.2.4 NC-Programme

Als im Jahr 1983 die DIN-Norm 66025 (Teil 1, DIN 1983) das letzte mal überarbeitet wurde, war der dem Programmierer zur Verfügung stehende Sprachumfang einer CNC sehr begrenzt. Die Befehle setzten sich vor Allem aus Wegbedingungen („G-Befehlen“) und Koordinatenwerten für verschiedene Achsen zusammen. Auch aktuellere Normen unterscheiden sich hiervon nicht (vgl. ISO 2009). Die folgende Weiterentwicklung der NC-Sprache folgte dann aber nicht einem einzelnen Weg, sondern wurde durch viele Hersteller von CNCs getrennt betrieben. Als Resultat existieren heute unterschiedlichste Formen der „DIN-ISO-Programmierung“ welche exemplarisch in Abbildung 2.6 dargestellt sind.

1	Siemens Sinumerik	Fanuc CNC	Bosch Rexroth MTX
2			
3	R1=0	#2=0	VAR1%=0
4	REPEAT	IF [#2 EQ 4.0] GOT09	REPEAT
5	R1=R1+1	#2=#2+1.0	VAR1%=VAR1%+1
6	G0 Z150	G00 Z150.0	G0 Z150
7	G1 X10 F500	G01 X10.0 F500.0	G1 X10 F500
8	UNTIL R1=4	GOT04	UNTIL VAR1%=4

Abbildung 2.6: Exemplarische Unterschiede in der Syntax verschiedener CNCs

Während manche NC-Sprachen sich nur unwesentlich von der DIN-Norm unterscheiden, haben andere Steuerungshersteller ihre NC-Sprache so erweitert und modifiziert, dass sie den etablierten Programmiersprachen, wie C oder Java, sehr nahe kommt. So sind beispielsweise bedingte Anweisungen, Schleifen und Arrays möglich. Trotzdem ist der Ursprung dieser NC-Sprachen unverkennbar geblieben, denn die G-Befehle nehmen immer noch eine wesentliche Rolle ein. Vielfach existieren nun aber Befehle nach DIN/ISO und herstellerspezifische Befehle parallel, welche in ihrer Hauptaufgabe das Gleiche bewirken, sich im Detail jedoch unterscheiden. Als Beispiel kann hier der Befehl genannt werden, welcher ein NC-Programm beendet. Während die DIN-Norm 66025 (Teil 2, DIN 1988) die Befehle „M02“ und „M30“ für ein Programmende mit oder ohne Rücksetzen der CNC vorsieht, gibt es bei CNCs von Siemens parallel auch noch ein „M17“ und „RET“ (für „return“). Sie bewirken beide auch ein Programmende, jedoch im ersten Fall mit einem Satzvorlaufstopp und im zweiten Fall ohne diesen (vgl. Kapitel 4.4.5). Der Unterschied mag marginal wirken, die richtige Wahl des NC-Befehls führt aber dazu, dass NC-Sätze schneller ausgeführt werden und so technische Nebenzeiten verkürzt werden oder ganz entfallen.

Die NC-Programme in der Großserienfertigung von Antriebsstrangkomponenten unterscheiden sich sehr stark. Das liegt daran, dass wie zuvor erläutert, sich die NC-Sprachen auf verschiedenen Steuerungen unterscheiden. Aber auch die NC-Programme auf gleichen CNCs differieren deutlich. Kauft der Prozesseigner neben der Werkzeugmaschine und der CNC auch den ganzen Fertigungsprozess, so erstellt der Maschinenhersteller auch die NC-

Programme. So finden sich in der Großserienfertigung neben Werkzeugmaschinen vieler verschiedener Hersteller auch unterschiedlichste Stile und Philosophien, ein NC-Programm aufzubauen. Hinzu kommt, dass ein Großteil der benutzten Hilfsfunktionen („M-Befehle“) in einem NC-Programm (vgl. Kapitel 4.4.3) von Maschine zu Maschine verschieden sind, da sie vom Maschinenhersteller weitgehend frei belegt werden können (vgl. DIN 1988, S.7). Auch werden NC-Programme nur in seltenen Fällen ausführlich mit Kommentaren versehen.

Um die Verständlichkeit von NC-Programmen zumindest teilweise erhöhen zu können, werden vom Prozesseigner mittlerweile auch Standards im Aufbau der NC-Programme entwickelt, deren Einhaltung vom Maschinenhersteller im Lastenheft gefordert wird. So sind die NC-Programme in ihrer Struktur zumindest ähnlich und besser verständlich. Entscheidet sich der Prozesseigner, das NC-Programm nicht mit zu bestellen, sondern selbst zu entwickeln, so bietet sich ihm die Gelegenheit, einen durchgängigen Standard über verschiedene Werkzeugmaschinen zu setzen. In diesen Standard können dann auch gleich Optimierungen zur Reduktion technischer Nebenzeiten eingearbeitet und Fertigungsprozesse von Beginn an effizienter gestaltet werden. Umsetzbar ist solch ein Standard zum Beispiel als Erweiterung des Lastenheftes für die Beschaffung neuer Werkzeugmaschinen oder als Integration in die Funktionalität eines Postprozessors, welcher die Daten aus einem CAD-CAM-System in ein steuerungsspezifisches NC-Programm überführt (vgl. Kapitel 5).

2.3 Stand der Forschung

Der Stand der Forschung zur Optimierung technischer Nebenzeiten kann grob in zwei Bereiche gegliedert werden: Einerseits gibt es Forschungsthemen, welche sich explizit technischen Nebenzeiten widmen. Da in diesem Bereich aber nur sehr wenige Veröffentlichungen existieren, werden andererseits auch andere Themen betrachtet, welche sich nicht explizit der Optimierung technischer Nebenzeiten widmen, sehr wohl aber durch Anpassung und Weiterentwicklung für eine Optimierung nutzbar gemacht werden könnten. Die Gründe für das weitestgehende Fehlen von Veröffentlichungen können nur vermutet werden. Ein wesentlicher Grund mag der starke Industriebezug sein. Optimierungsverfahren werden vielfach als schützenswertes Geschäftsgeheimnis gesehen, da sie letztlich auch einen Wettbewerbsvorteil darstellen. Nachfolgend wird eine Auswahl von vier Themen dargestellt, welche sich in Teilen der Optimierung technischer Nebenzeiten widmen. Jedoch erfolgt die Betrachtung dieser technischen Nebenzeiten in jeder Veröffentlichung unter anderen Voraussetzungen. So werden Optimierungsverfahren vorgestellt, welche sich für Einzel- und Kleinserien eignen oder Verfahren, welche sich stark an der Freiformflächenbearbeitung orientieren.

2.3.1 NC-Code Optimizer des IFW, Universität Hannover

In einem Projektabschlussbericht stellt das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover ein Computerprogramm vor, welches sich zur Optimierung mehrachsiger Werkzeugmaschinen eignen soll (vgl. Denkena 2012). Das „NC-Code Optimizer“ genannte Programm beinhaltet „Verfahren zur automatisierten Gestaltung und Optimierung nicht schneidender Werkzeugwege“ (Denkena 2012, S. 1). Die Idee für die Entwicklung eines solchen Optimierungswerkzeugs entstand aus dem Bedürfnis heraus, trotz komplizierter Wirkzusammenhänge, mehrachsiger Maschinen und komplexer Werkstücke, Prozesse für die Werkstattfertigung schon im CAM-System optimieren zu können. Dabei wurde auf Grund differierender Anforderungen in zwei grundsätzliche Arten der Optimierung unterschieden: Während bei schneidenden Wegen der Materialabtrag im Vordergrund einer Optimierung stand, lag der Fokus bei nicht schneidenden Bewegungen (technische Nebenzeiten) auf der Vermeidung von Kollisionen.

Das grundsätzliche Problem bei der Optimierung von Werkzeugbahnen zwischen zwei Bearbeitungen liege, so der Projektabschlussbericht, im hohen Aufwand, solche Bewegungen individuell zu programmieren. Vielmehr werde im Tagesgeschäft deshalb auf übliche Bewegungsmuster, wie das Anfahren einer globalen Rückzugsebene, zurückgegriffen. Weiterhin wird auf mögliche Varianten in der Reihenfolge mehrerer Bearbeitung eingegangen. Dabei sei es, trotz ähnlich zu erwartender Fertigungszeiten, ratsam, eine Reihenfolge zu wählen, welche das beste Fertigungsergebnis liefert.

Im Falle der Optimierung von Werkzeugbahnen wurde auch das Problem der Umfahrung von Störgeometrien betrachtet. Hierfür wurden in das Computerprogramm sechs Möglichkeiten der kollisionsfreien Bahnerzeugung integriert:

- Anfahren einer globalen Sicherheitsebene
- Anfahren einer lokalen Sicherheitsebene mit einer einzelnen Achse
- Anfahren einer lokalen Sicherheitsebene mit mehreren Achsen
- Bewegung, welche auf einem Spline basiert
- eine ebenenkonstante Umfahrung
- eine manuelle Bahnplanung

Im zweiten Teil des Projektabschlussberichts wird ein Verfahren vorgestellt, mit welchem es möglich sein soll, Werkzeugbahnen zu optimieren und die schnellste Reihenfolge bei mehreren Bearbeitungen zu finden. Hierbei wurde als Grundlage die Maschinenkinematik in die Bahnplanung mit einbezogen. Die maximale Geschwindigkeit und die maximale Beschleunigung der beteiligten Achsen wurden hierfür verwendet. Durch die Annahme eines

unendlichen Rucks vereinfacht sich dabei eine Bewegung in drei Phasen: Beschleunigung, max. Geschwindigkeit und Verzögerung. Das System soll sowohl für rein translatorische oder rotative Bewegungen, wie auch für eine Kombination beider, die Dauer für eine einzelne Werkzeugbahn bestimmen können. Daran anknüpfend wurde ein Bahnplanungsverfahren entwickelt, welches mit einer lokalen anstelle einer globalen Rückzugsebene arbeitet. Die Reihenfolge beginnt dabei mit festen Start- und Endpunkten, welche sich aus vorhergehender und nachfolgender Bearbeitung ergeben. Beginnend beim Startpunkt erfolgt die Entscheidung für den nächsten Punkt anhand der euklidischen Distanz zu den Nachbarknoten. Dieses Verfahren folgt dabei dem Dijkstra- oder dem A*-Algorithmus, welche beide den vermeintlich kürzesten Pfad ermitteln zu versuchen. Der aus dem Verfahren resultierende Pfad beinhaltet zumeist viele Richtungsänderungen und wird deshalb einer Linearisierung unterzogen. Hieraus resultiert ein optimierter Pfad, welcher aus Geraden, Kreissegmenten oder Splines bestehen kann (vgl. Denkena 2012, S. 22ff). Weiterhin wird in diesem Bericht auch auf das Travelling Salesman-Problem und dessen mit der Anzahl an Punkten exponentiell steigenden Komplexität eingegangen.

Zwar wurden die in diesem Abschlussbericht beschriebenen Verfahren explizit für eine Werkstattfertigung entwickelt, jedoch lassen sich diese in Teilen auch auf die Großserienfertigung übertragen. Der entscheidende Unterschied ist hierbei, dass NC-Programme nicht nur für den einmaligen Gebrauch erstellt werden, sondern oftmals über viele Jahre hinweg durchgehend genutzt werden. Deshalb kann auch wesentlich mehr Aufwand in die Optimierung technischer Nebenzeiten gesteckt werden, als es bei einer Werkstattprogrammierung jemals wirtschaftlich sinnvoll wäre. Der Fokus muss deshalb bei einer Großserienfertigung auf einer höheren Optimierungsgüte und weniger auf einer schnellen Umsetzbarkeit liegen.

Das im zweiten Teil des Berichts vorgestellte Verfahren geht zwar durch die Miteinbeziehung der Maschinendynamik den richtigen Weg, jedoch kann durch die Annahme eines unendlichen Rucks die Berechnung der Bewegungsdauer für viele Werkzeugmaschinen ungenau werden. Einige moderne Werkzeugmaschinen benötigen relativ lange, um mit voller Beschleunigung zu verfahren, da sie einen im Verhältnis zur Beschleunigung geringen Ruck besitzen (vgl. Tabelle 4.4 und 9.4). Diesem Umstand wird das in Kapitel 4.3.2 und 5.1.2 beschriebene Verfahren gerecht.

2.3.2 Veröffentlichung von R. Singh, u. a.

Während die in dieser Arbeit beschriebene Methodik das Ziel hat, technische Nebenzeiten und damit Verschwendungen im Prozess ohne eine Veränderung der Werkzeugmaschine zu minimieren, beschreiben Singh u.a. in ihrer Veröffentlichung ein anderes Verfahren, welches versucht, Verschwendungen zu reduzieren, indem es die Hardware-Konfiguration

einer Werkzeugmaschine optimiert (Singh 2010). Dabei werden die Anwender von CNC-Werkzeugmaschinen in zwei Gruppen unterschieden: Einerseits gibt es Unternehmen, zum Beispiel aus der Flugzeugindustrie, welche viele Teile in Kleinserie fertigen und so höchste Flexibilität fordern. Andererseits existieren Unternehmen, zumeist aus der Automobilindustrie, welche wenige Teile in großer Stückzahl fertigen. Für diese Unternehmen stehen Taktzeit und Stückkosten im Vordergrund. So wird, ausgehend von der Basiskonfiguration, für jede optionale Komponente der Werkzeugmaschine untersucht, ob sie für den jeweiligen Fertigungsprozess ausreichend Vorteile generiert. Aufgrund der marktbestimmenden Automobilindustrie wurden für den Fertigungsprozess als wichtigste Kriterien die Stückkosten, die Produktivität und die Prozessfähigkeit identifiziert. Als sekundäre Vorteile werden unter anderem Wartungsfreundlichkeit, Verfügbarkeit und Modularität aufgeführt.

Anhand der acht Arten der Verschwendung des „Lean Manufacturing“ (hier wird als achte Art die „ungenutzte Mitarbeiterkreativität“ genannt) untersuchen die Autoren die Auswirkungen einer zusätzlichen Maschinenkomponente auf den Gesamtprozess. Als Beispiel nennen sie die Hinzunahme eines hydraulischen Spannsystems, welches einerseits die Taktzeiten reduzieren und damit die Produktivität steigern kann, jedoch unter Umständen auch zu einer Stückkostensteigerung führen könnte. Die Lösung solcher Fragestellungen überführten die Autoren in ein Expertensystem, welches als Schnittstelle zwischen Maschineneigner und Hersteller der Maschinenkomponenten dienen soll. Anhand einer systematischen und wissenschaftlichen Methodik ermittelte das System die Maschinenkomponenten, welche sich sinnvoll in einer Werkzeugmaschine einsetzen lassen sollten.

Diese Veröffentlichung zeigt, dass der Grundgedanke der „Minimierung von Verschwendungen“ nicht nur auf ein gesamtes Fertigungssystem anwendbar ist, sondern auch auf kleine Teilgebiete sinnvoll angewendet werden kann. Darüber hinaus bestätigt diese Veröffentlichung auch die Bedeutung solcher Optimierungen in Werkzeugmaschinen der Großserienfertigung. Trotzdem lassen sich durch die richtige Wahl der Komponenten für eine Werkzeugmaschine nicht alle Verschwendungen vermeiden oder minimal halten. Eine oftmals unveränderliche Basiskonfiguration der Werkzeugmaschine oder der zwingende Einsatz von zusätzlichen Komponenten, welche zu spezifischen Verschwendungen führen, können jedoch durch eine nachfolgende Optimierung technischer Nebenzeiten abgemildert werden.

2.3.3 Arbeit von T. Kim

In der Dissertation von Kim (2001) wird ein Verfahren zur Bestimmung einer zeitoptimalen Fräsbahn auf einer Freiformfläche beschrieben. Auch hier wird klar in eine „effective cutting time“ und eine „non-effective cutting time“ (Kim 2001, S. 58) unterschieden. Jedoch unterscheiden sich die vom Autor beschriebenen Voraussetzungen für eine Bahnoptimierung sehr

deutlich von denen einer Fertigung von Antriebsstrangkomponenten. Während bei der Fertigung automobiler Komponenten nur in wenigen Fällen eine Freiformfläche gefräst werden muss, besteht die Bearbeitung in der Betrachtung von Kim nur aus einer reinen Freiformflächenbearbeitung. Die Fräsbahnen und damit auch die Übergänge von einer und in eine technische Nebenzeit sind dementsprechend frei wählbar - im Gegensatz zum Beispiel zu einer Bohrbearbeitung. So sei es das Ziel des Verfahrens, einen kinematisch und dynamisch optimalen Pfad zu finden, welcher die Summe technischer Haupt- und Nebenzeiten, also des gesamten Taktes, minimiert. Dabei werden auch die maximale Rauigkeit, der Fräsbahnabstand, die Achsgrenzen und die Achsdynamiken für die Optimierung herangezogen. Andere Einflussfaktoren - wie Kollisionsfreiheit, Zerspankräfte und Werkzeugverschleiß - wurden jedoch explizit aus der Betrachtung herausgenommen, um die Komplexität der Berechnung auf ein akzeptables Maß zu beschränken.

Diese Veröffentlichung zeigt, dass die Voraussetzungen für eine Optimierung von Werkzeugbahnen insbesondere bei Freiformflächen auch weit komplexer sein können, als es bei der Fertigung im Automobilbau meist der Fall ist. Außerdem verzichtet das vom Autor beschriebene Verfahren auf eine Betrachtung weiterer wichtiger Einflussfaktoren. So wäre insbesondere die Kollisionsvermeidung für eine Fertigung im Automobilbau enorm wichtig gewesen. Das Verfahren ist deshalb in die Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten nicht sinnvoll übertragbar.

2.3.4 Arbeit von T. Schröder

Einen gänzlich anderen Weg, die gesamte Bearbeitungszeit - und damit vor allem die technischen Nebenzeiten - zu reduzieren, geht Schröder (2007) in seiner Dissertation. Aus einer durchgeführten Anforderungsanalyse moderner Werkzeugmaschinen formulierte er ein „Masse-Arbeitsraum-Problem“, welches den Fall beschreibt, „dass ein zunehmend wachsender Arbeitsraum auch zwangsläufig in überproportional wachsenden Massen der zu bewegendenden Maschinenelemente resultiert“ (Schröder 2007, S. 151). Hierdurch würde die Dynamik der Werkzeugmaschine beschränkt. Dies könne auch nicht durch stärkere Antriebe oder eine Steigerung der Steifigkeit kompensiert werden. Um dieses Dilemma zu überwinden, wurde ein Konzept der „kinematisch redundanten Maschinen“ entwickelt, welches sich für einen industriellen Einsatz eignen soll. Deshalb wurden Algorithmen zur Bahnzerlegung entwickelt, welche sich in kommerzielle CNC-Systeme, wie eine Siemens Sinumerik 840D, implementieren ließen. Dabei wurden die Algorithmen in drei Klassen aufgeteilt: „Postprozessoralgorithmen“, „kognitive Satzverarbeitung“ und „reaktive Algorithmen“. Daran anknüpfend folgte eine Validierung an einer Demonstrationsmaschine, welche aber die durch den Autor gesetzten Ansprüche nicht komplett erfüllen konnte.

Die Dissertation von Schröder zeigt, dass auch die Optimierung technischer Nebenzeiten nicht immer einen konventionellen Aufbau einer Werkzeugmaschine als Grundlage haben muss. Durch die Entwicklung neuer, parallelkinematischer Werkzeugmaschinen und der beschriebenen Bahnplanung könnte die Dynamik gesteigert und die Dauer von Werkzeugbahnen reduziert werden. Jedoch haben sich solche Werkzeugmaschinen bisher nicht durchgesetzt und beschränken sich daher auf wenige Sondermaschinen.

2.4 Stand der Technik

Der nachfolgende Abschnitt widmet sich mit dem Stand der Technik zur Optimierung technischer Nebenzeiten. Dieser wird anhand vier verschiedener Gruppen unterschieden: Beginnend bei den Steuerungsherstellern folgt danach die Gruppe der Werkzeugmaschinenhersteller. Daran anknüpfend wird der Stand der Technik im Umfeld des Anwenders beziehungsweise des Prozesseigners beschrieben. Zuletzt erfolgt dies auch für die Dienstleister, welche eine Optimierung technischer Nebenzeiten als Teil ihres Geschäftsmodell sehen.

2.4.1 Steuerungshersteller

Die Steuerungshersteller bieten im Allgemeinen eine universell einsetzbare CNC an, welche für eine Vielzahl von Fertigungsprozessen eingesetzt werden kann. Dazu gehören beispielsweise Dreh- und Fräsprozesse oder auch Nibbeln und Stanzen (vgl. Bosch Rexroth 2015). Aber auch Werkzeugmaschinen, welche für das gleiche Fertigungsverfahren entwickelt wurden, unterscheiden sich je nach Hersteller oftmals erheblich. Die Parametrierung der CNC durch den Steuerungshersteller kann deshalb vorab nur in Grundzügen erfolgen. Der Großteil der Parametrierung wird dem Maschinenhersteller überlassen (vgl. Fanuc 2010a, S. 3).

In den letzten Jahren haben die Steuerungshersteller eine Vielzahl von Funktionen entwickelt und in ihre Steuerung integriert, welche zur Prozessoptimierung eingesetzt werden können. Dazu zählen auch Funktionen wie eine automatische Antriebsparametrierung (vgl. Siemens 2013f, S. 241ff) oder beispielsweise die Diagnosefunktionen (vgl. Kapitel 3.1.2). Eine Erweiterung der NC-Sprache von einer reinen DIN-ISO-Sprache zu einer fast vollständigen Hochsprache wurde durch die meisten Steuerungshersteller betrieben. Sie eröffnet die Möglichkeit, Programme auf vielfältige Weise zu erstellen. Damit geht jedoch auch die Gefahr einher, den falschen Befehl bei der Programmierung zu wählen und so Potenziale bei der Optimierung technischer Nebenzeiten unberührt zu lassen oder Prozesszeiten sogar zu verlängern.

2.4.2 Werkzeugmaschinenhersteller

Die Optimierung technischer Nebenzeiten steht bei vielen Werkzeugmaschinenherstellern im Fokus. Dabei ist auch eine Abkehr vom reinen Verkauf von Produktionsanlagen hin zu verknüpften Sach- und Dienstleistungen zu beobachten (vgl. Uhlmann 2011). Wie in Kapitel 2.2.1 dargelegt, werden beispielsweise Maschinenkomponenten entwickelt, die es ermöglichen, Verfahzeiten oder Werkzeugwechselzeiten stark zu verkürzen. Auf den entscheidenden Stellhebel zur Optimierung technischer Nebenzeiten - das NC-Bearbeitungsprogramm - hat der Maschinenhersteller aber nur Einfluss, wenn er für den gesamten Fertigungsprozess verantwortlich ist. Dies ist aber nicht immer der Fall. Besteht sein Auftrag nur darin, die Werkzeugmaschinen zu liefern, so beschränken sich seine Möglichkeiten in der Optimierung technischer Nebenzeiten nur auf die Maschine selbst und ihre Parametrierung in der Steuerung. Eine optimale Steuerungsparametrierung ist aber bei Unkenntnis des genauen Fertigungsprozesses und der darin eingesetzten Werkzeuge und Werkstücke nur schwer möglich. Es müsste deshalb eine weitere Optimierung der Parametrierung während der Inbetriebnahme des Gesamtprozesses erfolgen. Dies kann durch den Prozesseigner aber nur in wenigen Fällen selbstständig durchgeführt werden, da hierfür oftmals das Wissen fehlt und eine Änderung an der Steuerungsparametrierung zum Verlust der Gewährleistung für die Werkzeugmaschine führen kann.

Deutlich anders kann der Optimierungsprozess technischer Nebenzeiten erfolgen, wenn der Werkzeugmaschinenhersteller für den gesamten Fertigungsprozess verantwortlich ist. In diesem Fall kennt er den Fertigungsprozess in all seinen Details - inklusive der darin verwendeten Werkzeuge und Werkstücke. Die Parametrierung der Steuerung und die NC-Programme können dem Fertigungsprozess optimal angepasst werden. Jedoch führt dieser Weg deshalb nicht zwingend zu minimalen technischen Nebenzeiten, denn selbstverständlich wird der Maschinenhersteller den Fertigungsprozess und das damit verbundene NC-Bearbeitungsprogramm nur so weit optimieren, wie es notwendig ist, um die vereinbarte Ausbringung des Fertigungssystems mit der geforderten Anzahl an Werkzeugmaschinen zu erfüllen. Dies führt letztendlich auch dazu, dass in vielen Fällen die technischen Nebenzeiten nicht minimal sind und eine weitere Optimierung durch den Prozesseigner möglich wird. Die Werkzeugmaschinenhersteller verfügen dabei über eine individuelle Methodik, technische Nebenzeiten zu reduzieren. Viele der angewandten Verfahren sind in ihren Grundzügen gleich, unterscheiden sich jedoch in ihrer Ausführung und ihrem Ergebnis.

2.4.3 Prozesseigner und Anwender

Die vielfältigen Gründe, wie sie in Kapitel 1.1 genannt wurden, zwingen den Prozesseigner beziehungsweise den Anwender, Prozesse zu optimieren. Insbesondere die Optimierung

technischer Nebenzeiten verspricht oftmals deutliche Erfolge. Die für den Anwender zur Verfügung stehenden Optimierungsverfahren sind sehr umfangreich und wurden durch die vielen Erfahrungen der letzten Jahre ständig angepasst und erweitert. Das erforderliche Wissen für eine zielgerichtete Optimierung - besonders bei speziellen Prozessen und Maschinen - kann damit sehr umfangreich sein. Deshalb wurden durch den Prozesseigner in den vergangenen Jahren vermehrt Optimierungsspezialisten ausgebildet, welche mit den verschiedensten Optimierungsverfahren zur Minimierung technischer Nebenzeiten vertraut gemacht wurden. Doch auch für solche Spezialisten ist es zumeist nicht möglich, alle Verfahren sicher anwenden zu können. Teilweise ist dies auch durch die verschiedenen Berufe der Spezialisten und das damit verbundene Wissen und die Erfahrungen begründet. Daraus resultiert, dass oftmals nur ein Bruchteil der zur Verfügung stehenden Optimierungsverfahren zur Anwendung kommt und je nach Spezialist unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden. Vom Prozesseigner vorgegebene Optimierungsziele können so nicht immer erreicht werden, wodurch weitere Optimierungsschritte notwendig werden.

2.4.4 Dienstleister und Softwareanbieter

Ein weiterer Schritt der Optimierung stellt die Beauftragung von Dienstleistern dar, welche sich explizit der Optimierung technischer Nebenzeiten widmen (vgl. saveab 2013; z-optimations 2015). Allein die Existenz solcher Dienstleister zeigt, dass dieses Thema sehr wichtig ist. Zugleich offenbart dies aber auch, dass oftmals die Kapazität und das Wissen, um eine solche Optimierung durchzuführen, beim Prozesseigner nicht oder nur unzureichend vorhanden ist. Die große Anzahl der Kunden, mit welchen solche Dienstleister auf ihren Internetseiten werben, belegt weiterhin, dass dies nicht nur einzelne Unternehmen sondern einen Großteil der fertigenden Industrie betrifft. Die auf dem Markt existierenden Dienstleister bieten maßgeschneiderte Optimierungen für einzelne Werkzeugmaschinen oder ganze Fertigungslinien an und können mit ihrem umfangreichen Wissen deutliche Optimierungsergebnisse bei der Reduktion technischer Nebenzeiten erzielen.

Neben Dienstleistern, welche die Optimierung technischer Nebenzeiten direkt beim Kunden anbieten, gibt es auch eine Vielzahl an Unternehmen, welche CAD-CAM-Softwarewerkzeuge mit Optimierungspaketen anbieten. Typische Beispiele solcher Softwarewerkzeuge sind „hyperMILL“ (OPENMIND 2015) und „VERICUT“ (CGTech 2015). Die Funktionalitäten beschränken sich aber zumeist auf die kollisionsfreie Bahnplanung des Werkzeugs. So werden zum Beispiel Rückzugsebenen minimiert oder die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs angepasst (vgl. Kapitel 4.3).

2.5 Fazit

Die fehlende Existenz einer eindeutigen Definition technischer Nebenzeiten machte es notwendig, eine eigene Definition zu treffen. Sie orientiert sich an den Vorgaben aus der Literatur und der Industrie, zugleich wurde sie aber auch um Details ergänzt, um zuvor bestehende Unschärfen zu beseitigen.

Zum Stand der Technik kann zusammenfassend gesagt werden, dass technische Nebenzeiten eindeutig im Fokus der fertigen Industrie stehen. Jedoch unterscheiden sich die Bedingungen der unterschiedlichen Ausprägungen einer Fertigung erheblich. Dies mündet letztlich auch in stark differierende Verfahren zur Optimierung technischer Nebenzeiten. Die speziellen Bedingungen einer Großserienfertigung von Antriebsstrangkomponenten machen es erforderlich, eigenständige Verfahren zu entwickeln und zu beschreiben. Insbesondere die verstärkte Nutzung von universellen Bearbeitungszentren hat die Erwartungen an solche Verfahren in den letzten Jahren stark steigen lassen. Erschwerend für eine eindeutige Beschreibung solcher Verfahren erweist sich vor allem die NC-Sprache selbst. Durch ihre steuerungsspezifischen Ausprägungen und den erheblich abweichenden Funktionsumfang verschiedener CNCs ist es nicht immer möglich, Optimierungsverfahren zu beschreiben, welche sich universell einsetzen lassen. Vielmehr führt dies oftmals dazu, dass die Verfahren auf einen expliziten Typ von CNC zugeschnitten sind.

Die Optimierungsprojekte, welche durch den Prozesseigner und die Anwender in der automobilen Fertigung unternommen werden, sind mittlerweile sehr umfassend und weit entwickelt. Jedoch ist die Gesamtheit der zur Verfügung stehenden und zukünftigen Optimierungsverfahren derart komplex, dass auch die Ausbildung von Experten nicht immer ausreichend ist. Die Existenz von Optimierungsdienstleistern stützt diese These. Auch die auf dem Markt verfügbaren CAD-CAM-Systeme weisen zwar Funktionen zur Optimierung technischer Nebenzeiten auf, jedoch genügen diese vielfach nicht den Anforderungen. Eine solche Optimierung muss über die Vermeidung von Kollisionen und der Berechnung der kürzesten Gesamtstrecke einer Bearbeitungsreihenfolge hinaus gehen.

Über das Fehlen geeigneter Verfahren für eine Großserienfertigung in der Literatur lässt sich nur mutmaßen. Der Grund hierfür dürfte vor allem in der Wahrung von spezifischem Unternehmenswissen liegen, welches letztlich auch einen Wettbewerbsvorteil verspricht. Den fehlenden Veröffentlichungen mit Bezug zur Großserienfertigung stehen andere entgegen, welche sich an der Einzel- und Kleinserienfertigung oder an der Freiformflächenbearbeitung orientieren. Die dort dargestellten Verfahren eignen sich jedoch nur sehr bedingt für einen Einsatz in der Großserienfertigung von Antriebsstrangkomponenten. Trotzdem zeigen diese Veröffentlichungen, dass die Optimierung technischer Nebenzeiten ein Ziel der gesamten industriellen Fertigung darstellt.

3 Potenzialanalyse

Die Optimierung technischer Nebenzeiten stellt ein wirkungsvolles Werkzeug zur Effizienzsteigerung von Fertigungsprozessen dar. Verschwendungen im Fertigungsprozess können aber nur zielgerichtet minimiert oder gar eliminiert werden, wenn sie zuvor erkannt wurden. Die volle Wirkung einer solchen Optimierung wird erst dann erreicht, wenn ein wesentlicher Teil der Potenziale erkannt und die richtigen Methodenbausteine zur Optimierung technischer Nebenzeiten genutzt werden. Auch durch die Vielzahl an Eingangsgrößen, welche alle Auswirkung auf die Effektivität der einzelnen Verfahren haben, ist es zwingend notwendig, vor der eigentlichen Optimierung eine Potenzialanalyse durchzuführen. Ohne sie würden die Ergebnisse einer Optimierung zumeist nur zufällig entstehen und wären damit auch nur wenig zufriedenstellend.

Um Potenziale für eine Optimierung technischer Nebenzeiten erkennen zu können, müssen in einem ersten Schritt immer zuerst Daten gewonnen werden. Die Erfassung dieser Daten - und später auch die Datenanalyse - kann dabei prinzipiell auf zwei grundlegend verschiedene Arten erfolgen. Die erste stellt die Beobachtung des Fertigungsprozesses dar. Eine Prozessbeobachtung setzt dabei zwingend voraus, dass das zu beobachtende Fertigungssystem real existiert und in Betrieb ist. Wie im Fachartikel „Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten“ von Bosch u.a. (2015) beschrieben, kann die Prozessbeobachtung auf vier verschiedenen Wegen erfolgen: Durch die visuelle Beobachtung des Fertigungsprozesses direkt an der Werkzeugmaschine - gegebenenfalls mit Hilfe von Kameras, zweitens durch die Nutzung von steuerungsintegrierten Diagnosefunktionen, drittens mit Hilfe der Protokollierung von Prozessdaten in Dateien auf der CNC und zuletzt durch Fernzugriff auf Prozessdaten über den OPC-Industriekommunikationsstandard.

Die zweite grundlegend verschiedene Art, Daten des Fertigungsprozesses zu gewinnen, ist durch das „NC-Programmarchiv“ gegeben. Der überwiegende Teil der Steuerungshersteller fasst alle auf der Steuerung befindlichen NC-Programme in einen Programm-Container zusammen. Dieser wird gemeinhin als NC-Programmarchiv bezeichnet. So befinden sich in einem NC-Programmarchiv einer Siemens Sinumerik 840D neben allen Bearbeitungsprogrammen auch Zyklenprogramme, Makros und die Steuerungsparametrierungsdatei. Mit Hilfe dieser verschiedenen Dateien ist es möglich, Optimierungspotenziale zu erkennen, ohne dass das Fertigungssystem in Betrieb genommen werden muss. Wird das NC-Programmarchiv

anhand vorangegangener Projekte vorab erstellt, so muss für eine Potenzialanalyse das Fertigungssystem noch gar nicht physisch existieren. Dies unterscheidet sich grundlegend von der Prozessbeobachtung.

Zwischen den zuvor genannten verschiedenen Arten, Prozessdaten zu gewinnen, existiert auch ein Zwischenbereich, welcher von der CNC-Bearbeitungssimulation abgedeckt wird. Die CNC-Bearbeitungssimulation kann dabei verschiedenartig aufgebaut sein. Drei unterschiedliche Systeme werden nachfolgend erörtert: Die CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern, mit CNC als Hardware-in-the-Loop-System und mit CNC-Kern als Software-in-the-Loop. Sie bilden die Brücke zwischen realer Prozessbeobachtung und reiner Analyse anhand des NC-Programmarchivs. Die CNC-Bearbeitungssimulation bietet die Möglichkeit, mit dem NC-Programmarchiv und den CAD-Modellen von Werkzeugmaschine, Werkstück, Spannsystem und Werkzeugen den Fertigungsprozess zu visualisieren und zu analysieren. Die CNC als Hardware-in-the-Loop-System und der CNC-Kern als Software-in-the-Loop erweitern diese Vorgehensweise um einen weiteren Schritt. Durch die physische Präsenz der Steuerung beziehungsweise der vollständigen Abbildung des CNC-Kerns kann damit auch auf das Verhalten der CNC im realen Fertigungssystem geschlossen werden.

Neben den deutlich differierenden Möglichkeiten, Prozessdaten zu gewinnen, unterscheiden sich auch die Analyseverfahren weitestgehend. So besitzen die aus einer Prozessbeobachtung stammenden Daten immer einen Zeitstempel, mit welchem es möglich ist, Ausführungszeiten zu bestimmen. Im Gegensatz hierzu stehen die gewonnenen Daten aus einem NC-Programmarchiv. Sie besitzen allesamt keinen Zeitstempel und können deshalb nur einer qualitativen Analyse unterzogen werden. Die aus einer CNC-Bearbeitungssimulation stammenden Daten beruhen zwar zum großen Teil auf dem NC-Programmarchiv, durch die Visualisierung innerhalb der Computerprogramme haben diese Systeme aber auch einen beobachtenden Charakter und bieten auch Funktionen zur Prozessdatengewinnung.

Die unterschiedlichen Wege der Potenzialanalyse sind in der Abbildung 3.1 nochmals zusammengefasst. Ihre Vor- und Nachteile werden nachfolgend detailliert diskutiert und daran anknüpfend Empfehlungen ausgesprochen, unter welchen Voraussetzungen sich welche Form der Potenzialanalyse am besten eignet.

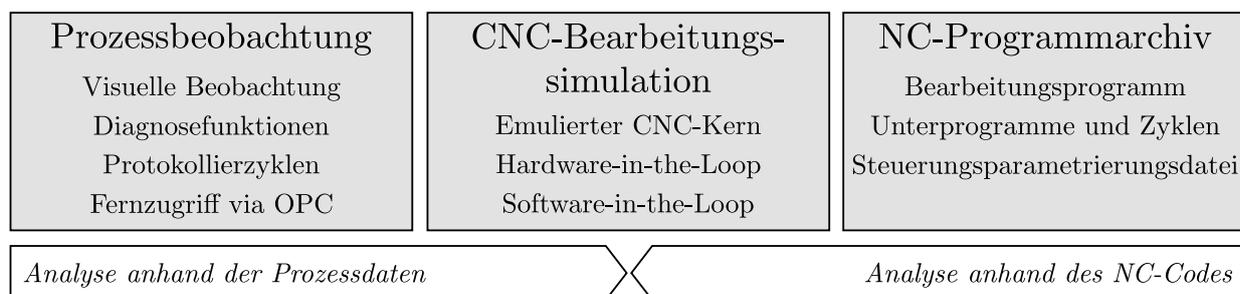


Abbildung 3.1: Strukturierung der Verfahren zur Potenzialanalyse

3.1 Erfassung und Analyse durch Prozessbeobachtung

Auf die Erfassung von Prozessdaten durch Beobachtung wurde schon im Fachartikel „Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten“ (Bosch u.a. 2015) eingegangen. Sie kann dabei auf verschiedene Arten erfolgen - vier dieser Verfahren werden nachfolgend vorgestellt. Charakteristisch bei allen vorgestellten Verfahren der Prozessbeobachtung ist, dass Beginn und Ende einer technischen Nebenzeit erfasst werden soll und damit deren Dauer bestimmt werden kann.

3.1.1 Visuelle Beobachtung

Der simpelste Weg, einen Fertigungsprozess zu untersuchen, ist die visuelle Beobachtung. Sollte der Fertigungsprozess gut zu betrachten sein und ist das Ziel der Potenzialanalyse, die größten Verschwendungen im Prozess ausfindig zu machen, so kann dieser Weg ganz ohne Hilfsmittel auskommen. Die visuelle Beobachtbarkeit ist bei modernen Werkzeugmaschinen aber zumeist stark eingeschränkt. Sie sind vollständig umhaust und besitzen - auch auf Grund spezieller Bauformen - nicht immer ein Sichtfenster zum Arbeitsraum. Vorhandene Sichtfenster sind meist sehr klein und durch Späne, Stäube und Flüssigkeiten verschmutzt. Hinzu kommt, dass heutige Werkzeugmaschinen sehr dynamisch agieren können und somit gesuchte technische Nebenzeiten nur Bruchteile einer Sekunde beobachtbar sind. Diese Hemmnisse sind ohne Hilfsmittel nicht zu überwinden und würden nur zu einem nicht zufriedenstellenden Ergebnis führen.

Ein wesentliches Hilfsmittel bei der visuellen Beobachtung des Fertigungsprozesses stellt die Gruppe der so genannten „Action-Kameras“ dar. Die Kamera des Marktführers GoPro wurde ursprünglich entwickelt, um Aufnahmen während des Surfens machen zu können (vgl. Malakye 2010). Diese Kameras eignen sich aber auch für einen Einsatz in Werkzeugmaschinen. Durch ihr schützendes Gehäuse ist es möglich, die Kamera im Arbeitsraum zu platzieren und sie prozessspezifischen Stoffen, wie Kühl- und Schmiermittel, auszusetzen. So ist man bei der Prozessbeobachtung nicht mehr auf ein Sichtfenster zum Arbeitsraum angewiesen. Jedoch verschmutzt auch das Gehäuse der Kamera durch Späne oder Stäube leicht. Außerdem behindert oftmals ein Nebel aus Kühl- und Schmierstoffen die Sicht, da viele Werkzeuge auf eine Hochdruckkühlung und -schmierung angewiesen sind, ohne welche sie schnell Schaden nehmen würden.

Weiterhin ist ein nicht zu vergessender Nachteil solcher „Action-Kameras“, dass sie zuvor im Arbeitsraum angebracht und ausgerichtet werden müssen. Hierfür muss der Fertigungs-

prozess angehalten und der Arbeitsraum zugänglich gemacht werden. Dies ist aber auf Grund eines zu erfüllenden Produktionsprogramms, welches kaum Unterbrechungen duldet, nicht immer akzeptabel. Die Auswertung einer solchen Videoaufnahme kann je nach gewünschtem Detaillierungsgrad äußerst aufwendig ausfallen. Um auch sehr kleinen technischen Nebenzeiten eine Ausführungsdauer zuweisen zu können, kann es notwendig werden, die Videoaufnahme Bild für Bild zu betrachten. Weiterhin gibt es auch einige technische Nebenzeiten, die zwar in der Steuerung ausgeführt werden, aber zu keiner beobachtbaren Reaktion der Werkzeugmaschine führen und somit auf einer Videoaufnahme nicht zu erkennen sind (vgl. Tabelle 3.1).

3.1.2 Diagnosefunktionen

Der zweite Weg, Prozessdaten durch Beobachtung zu gewinnen, wird durch verschiedenste Diagnosefunktionen an der Steuerung vieler Hersteller möglich. In erster Linie dienen die Diagnosefunktionen zur „Fehlersuche und -beseitigung sowie zur Maschinenleistungs- und Prozessleistungsanalyse“ (Siemens 2013b, S. 399). Das „cycle time analysis tool“ der Bosch Rexroth AG wird als „leistungsstarkes Werkzeug für die CNC-Systeme IndraMotion MTX zur gezielten und effektiven Optimierung der Maschinentaktzeit“ bezeichnet (Bosch Rexroth 2010a, S. 14). Gemein haben beide Systeme, dass sie zwar der Prozessanalyse dienen sollen, aber durch ihre Fülle an aufzeichenbaren Prozessparametern für einen nicht versierten Anwender oftmals zu komplex erscheinen.

Die Diagnosefunktionen der neueren Siemens Sinumerik 840D-Steuerung erlauben es, verschiedenste Prozessparameter mit einer hohen Aktualisierungsrate aufzuzeichnen, beispielsweise im Lage- oder Interpolationstakt (vgl. Siemens 2013b, S. 400). Das Ergebnis lässt sich in einer XML-Datei ablegen und damit in Office-Programmen einfach auswerten. Technische Haupt- und Nebenzeiten können sogar auf direktem Wege während des Fertigungsprozesses mitgeschrieben werden (vgl. Abbildung 3.2). Jedoch wird das dahinter liegende Schema, nach welchem die Auftrennung in technische Haupt- und Nebenzeiten erfolgt, nicht offengelegt. Eine Auswertung ist aber - im Hinblick auf die verschiedenen, aktuell koexistierenden Definitionen technischer Nebenzeiten - nicht eindeutig (vgl. Kapitel 2.1). Mittels der Diagnosefunktionen können jedoch nur numerische Variablen aufgezeichnet werden, die Aufzeichnung von String-Variablen ist nicht möglich (vgl. Siemens 2013b, S. 411). Der Inhalt des ausgeführten NC-Satzes kann somit nicht aufgezeichnet werden. Eine Verknüpfung mit dem NC-Programm könnte hierbei aber manuell erfolgen.

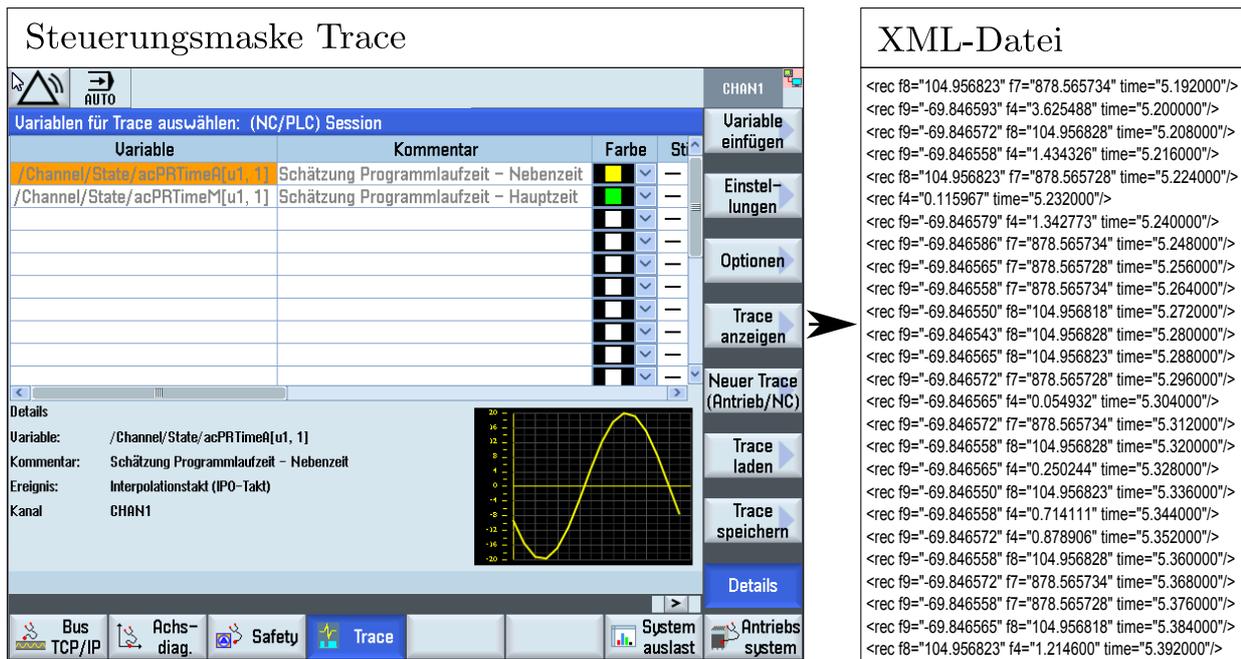


Abbildung 3.2: Trace-Funktion einer Siemens Sinumerik 840D sl mit HMI operate

Der Anteil technischer Nebenzeiten am Gesamtprozess, welche mit Hilfe der Diagnosefunktionen aufgezeichnet wurden, kann zwar bestimmt werden, jedoch sind die Gründe für die einzelnen technischen Nebenzeiten so nicht erkennbar. Vielmehr sollten dazu parallel weitere Prozessdaten erfasst werden. Auf Grund der enormen Anzahl zur Verfügung stehender Parameter kann eine Vielzahl verschiedener Parametersätze aufgezeichnet werden. Im Hinblick auf die Ursachen technischer Nebenzeiten sind vor allem der Lageistwert bzw. die Ist-Geschwindigkeit betroffener Achsen aufzuzeichnen. So kann die Dauer von Stillständen einzelner Achsen bestimmt werden. Weiterhin ist es durch die Aufzeichnung der Spindellast sehr gut zu erkennen, wann das Werkzeug das Werkstück berührt und damit die technische Nebenzeit endet - oder umgekehrt, wann sie beginnt (vgl. Kapitel 2.1.1). Weitere aufzeichnende Parameter können je nach betrachtetem Fertigungsprozess sehr unterschiedlich sein und liegen deshalb im Ermessen des Anwenders. Auch hier gilt, dass nicht alle Arten technischer Nebenzeiten durch die Diagnosefunktionen an der Steuerung sichtbar werden (vgl. Tabelle 3.1).

3.1.3 Protokollierzyklen

Ein weiterer Weg, technische Nebenzeiten zu erfassen, ist ebenfalls direkt an der Werkzeugmaschine möglich. CNCs verschiedener Hersteller, wie die Siemens Sinumerik 840D, erlauben es, während der Ausführung eines NC-Programms, in andere Dateien zu schreiben oder diese gar neu zu erstellen. Dadurch wird es möglich, einfache Textdateien oder auch

neue NC-Programme parallel zur Bearbeitung zu generieren. Auch Zustandsdaten lassen sich so auslesen und weiterverwenden. Die Anzahl zur Verfügung stehender Zustandsdaten entspricht in etwa dem Umfang der Diagnosefunktionen, auch hier können einige Systemvariablen zur Erfassung technischer Nebenzeiten genutzt werden. Diese Funktionen einer Steuerung erlauben es damit, Zustandsdaten zu erfassen und innerhalb der CNC zu protokollieren. Außerdem ist es damit auch möglich, die erfassten Daten direkt weiterzuverarbeiten und so die technischen Nebenzeiten zu berechnen und zu protokollieren. Der für eine Protokollierung notwendige NC-Programmcode kann in universelle Zyklenprogramme abgelegt und damit je nach Einsatzwunsch im NC-Bearbeitungsprogramm aufgerufen werden. So kann die Protokollierung auf einfachem Wege gestartet, unterbrochen oder abgebrochen werden (vgl. Abbildung 3.3).

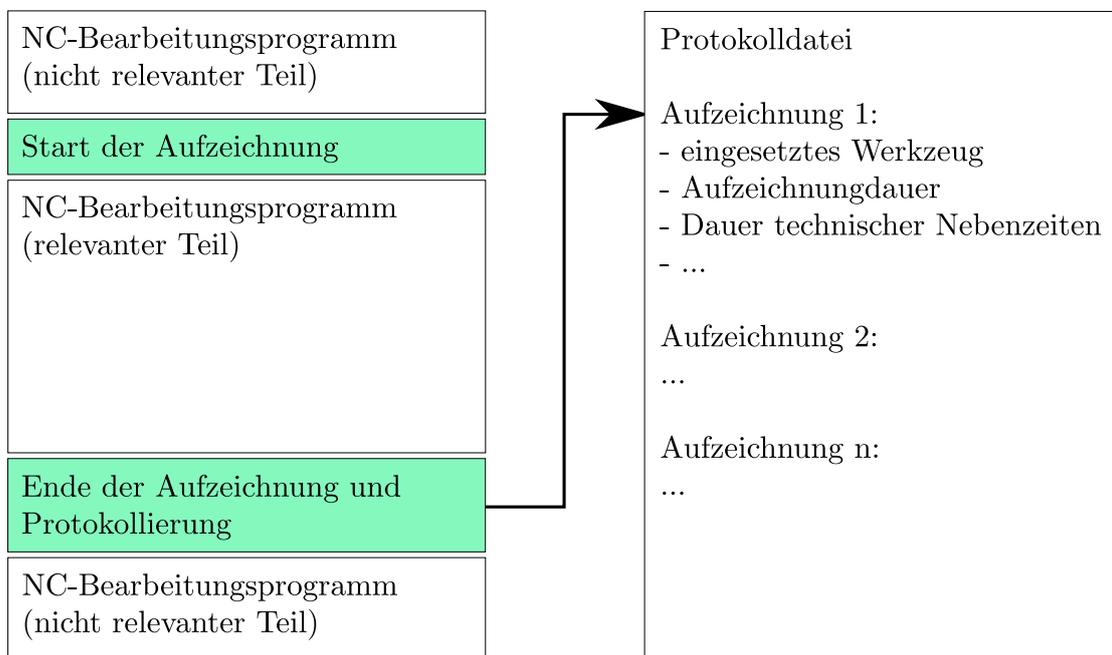


Abbildung 3.3: Prinzipdarstellung von Protokollierzyklen

Die sofortige Auswertung der erfassten Daten im Fertigungssystem stellt den wichtigsten Vorteil dieser Art der Erfassung technischer Nebenzeiten dar. Der zusätzliche Schritt einer Auswertung am Computer, wie er bei einer visuellen Beobachtung oder den Diagnosefunktionen notwendig ist, kann hierbei entfallen. Dies steigert vor allem die Akzeptanz bei den Mitarbeitern im Fertigungssystem. Jedoch besitzen auch die Protokollierzyklen Nachteile: Mit ihnen lassen sich zwar relativ einfach die Ausführungszeiten einzelner NC-Sätze bestimmen, dies entspricht aber nicht genau der in Kapitel 2.1 getroffenen Definition technischer Nebenzeiten. Um mit Protokollierzyklen definitionsgemäß aufzuzeichnen, müssten viel mehr Zustandsdaten mit aufgenommen werden. Dieser Mehraufwand rechtfertigt aber nicht den Wunsch, der Definition technischer Nebenzeiten exakt zu entsprechen. Außerdem besitzen

Protokollierzyklen noch einen entscheidenden Nachteil: Sie beeinflussen den Fertigungsprozess. Der größere Aufwand, welchen die CNC durch die Protokollierung verursacht, steigert zwar die Laufzeit des NC-Bearbeitungsprogramms merklich, das übergeordnete Ziel bei der Nutzung solcher Protokollierzyklen ist aber die Optimierung technischer Nebenzeiten. Dies steht somit in klarem Widerspruch zueinander, weshalb eine Erfassung von Prozessdaten durch Protokollierzyklen immer nur temporär über wenige Takte hinweg erfolgen sollte.

3.1.4 Fernzugriff via OPC

Die vierte Art, technische Nebenzeiten in einem Fertigungsprozess durch Beobachtung zu erfassen, ist durch den Fernzugriff auf die CNC möglich. In einer modernen Großserienfertigung sind zumeist alle Werkzeugmaschinen mit dem unternehmensinternen Netzwerk verbunden. Der Anschluss dient im Wesentlichen dazu, den Status verschiedener Systeme abrufbar zu machen, außerdem um Störungsmeldungen und -gründe schnell und automatisiert zu kommunizieren. Dabei kann der Fernzugriff über den Kommunikationsstandard „OPC“ erfolgen. Ursprünglich geschaffen, um industriellen Anlagen eine universelle Verständigungsmöglichkeit zu geben, vollzog die OPC Foundation in der neuesten Ausprägung der „OPC Unified Architecture (OPC UA)“ den Wechsel von der veralteten COM/DCOM-Technologie hin zu einem plattformunabhängigen, serviceorientierten Webservice bzw. einem TCP-basiertem Protokoll. Mit dieser einzelnen, neuen Spezifikation wurden die zuvor koexistierenden Spezifikationen zur Aufzeichnung von Zustandsdaten, Alarmen, Events und der Zustandsdatenhistorie abgelöst (vgl. Mahnke u.a. 2009).

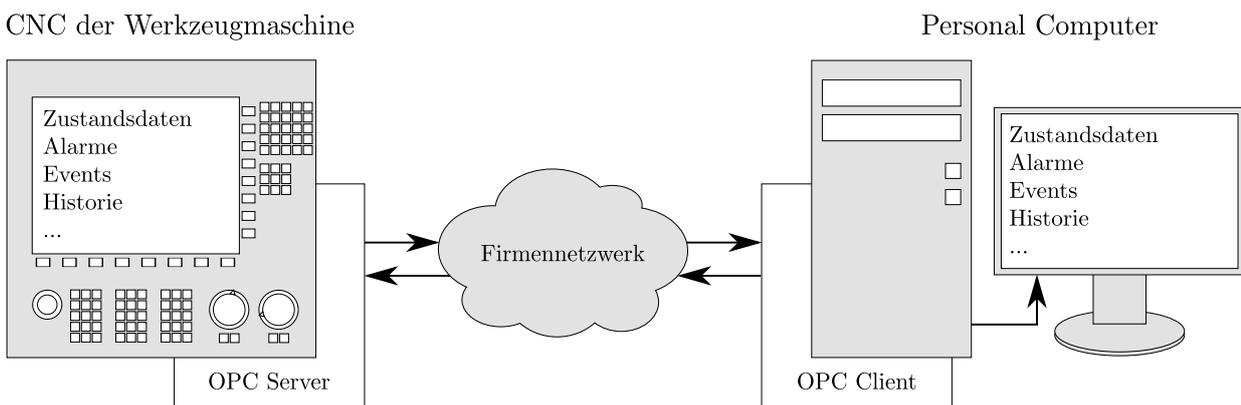


Abbildung 3.4: Fernzugriff auf eine CNC via OPC

Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, ist es mit Hilfe der standardisierten OPC-Schnittstelle möglich, Zustandsdaten der Werkzeugmaschine auszulesen. Gegenüber den auf vielen CNCs integrierten Diagnosefunktionen ist die Erfassung via OPC aber sowohl in der Anzahl erfassbarer Zustandsdaten, wie auch der minimalen Aktualisierungsrate im Nachteil. Jedoch

ist auch hier die Aufzeichnung der geschätzten technischen Nebenzeiten - wie bei den Diagnosefunktionen - durchführbar (vgl. Siemens 2000). Die Aktualisierungsrate, mit welcher die Zustände verschiedener Variablen aufgezeichnet werden können, kann nicht wie bei den Diagnosefunktionen im Lageregeltakt oder im Interpolationstakt erfolgen, vielmehr liegt das Minimum bei einem Vielfachen des Lageregeltakts. So liegt beispielsweise die Herstellervorgabe bei einer Siemens Sinumerik 840D bei hundert Millisekunden (vgl. Siemens 2001, S. 18).

Einen entscheidenden Vorteil in der Erfassung technischer Nebenzeiten durch Fernzugriff stellt aber die Erfassbarkeit von String-Variablen dar. Hierdurch wird es möglich, auch Zustandsvariablen zu erfassen, die Wörter und Sätze beinhalten (vgl. Siemens 2000). Eine dieser String-Variablen ist der aktuell in Ausführung befindliche NC-Satz. Mittels zweier aufeinanderfolgenden aufgezeichneten NC-Sätzen und den dazugehörigen Zeitstempeln kann so die Ausführungsdauer des ersten NC-Satzes ermittelt werden. Auf Grund der begrenzten Aktualisierungsrate können aber nur NC-Sätze aufgezeichnet werden, welche eine gewisse Ausführungsdauer überschreiten. So ist es nicht sicher möglich, technische Nebenzeiten zu erfassen, die nur wenige Millisekunden dauern. Außerdem weichen die mit dieser Methode erfassten technischen Nebenzeiten von der in Kapitel 2.1 getroffenen Definition ab. Trotzdem ist dieser Weg, technische Nebenzeiten zu erfassen, von großer Bedeutung. Durch den Fernzugriff ist es möglich, sich mit den meisten CNCs weltweit zu verbinden - sofern sie sich im Firmennetzwerk oder gar Internet befinden. Dies erweist sich in besonderem Maße bei global produzierenden Unternehmen als Vorteil.

3.1.5 Datenanalyse und -darstellung

Die zuvor vorgestellten Verfahren der Prozessbeobachtung ermöglichen es, die Ausführungsdauer von NC-Sätzen und damit auch die technischer Nebenzeiten zu bestimmen. Eine unverarbeitete Darstellung dieser gewonnenen Daten ist aber nicht sinnvoll. CNC-Bearbeitungsprogramme bestehen oftmals aus vielen tausend Zeilen Programmcode und damit auch aus vielen kleinen Abschnitten technischer Nebenzeiten. Deshalb wird in diesem Abschnitt eine Methode nach Bosch u.a. 2015 vorgestellt, die Prozessdaten in drei verschiedenen Stufen darstellt.

Allen Darstellungsstufen geht voraus, dass die erfassten Prozessschritte entweder einer technischen Haupt- oder Nebenzeit zugeordnet werden müssen. Wurde in jedem Prozessschritt auch der dabei gültige NC-Satz aufgezeichnet (vgl. Kapitel 3.1.4), so kann die Zuordnung weitestgehend automatisiert nach Schlüsselwörtern erfolgen. Beispielsweise wird ein NC-Satz, welcher „G0“ enthält, als technische Nebenzeit erkannt, während ein NC-Satz mit „G1“ auf eine technische Hauptzeit deutet. Dies weicht zwar von der in Kapitel

2.1 getroffenen Definition technischer Nebenzeiten ab, jedoch ist eine Auswertung dadurch weitestgehend automatisierbar. Wurde durch die gewählte Erfassungsmethode nicht direkt der jeweils gültige NC-Satz aufgezeichnet, so stellt sich eine mögliche Automatisierbarkeit komplexer dar, denn zusätzlich erfasste Daten müssen korrekt interpretiert werden (vgl. Kapitel 3.1.2). Alternativ muss die Zuordnung manuell erfolgen. Der Aufwand einer manuellen Zuordnung eines jeden Prozessschrittes würde aber im Allgemeinen nicht im Verhältnis zum Nutzen stehen. Hierbei sollte deshalb die Zuordnung gröber und in sinnvollen Blöcken erfolgen. Dies schließt aber die vollständige Darstellung in allen drei nachfolgend aufgeführten Stufen aus.

Die in Abbildung 3.5 gezeigte erste Stufe der Darstellung technischer Nebenzeiten dient dazu, einen schnellen Überblick über den gesamten Fertigungsprozess in einer Werkzeugmaschine - oder gar einer Fertigungslinie - zu geben (vgl. Abbildung 1.1). Dabei kann die Darstellung zwei- oder dreigliedrig erfolgen. Dies hängt davon ab, ob eine explizite Ausweisung des Werkzeugwechsels gewünscht ist. In einigen Fertigungsprozessen kann der Anteil von Werkzeugwechselzeiten durch eine Vielzahl im Prozess genutzter Werkzeuge einen wesentlichen Teil einnehmen.

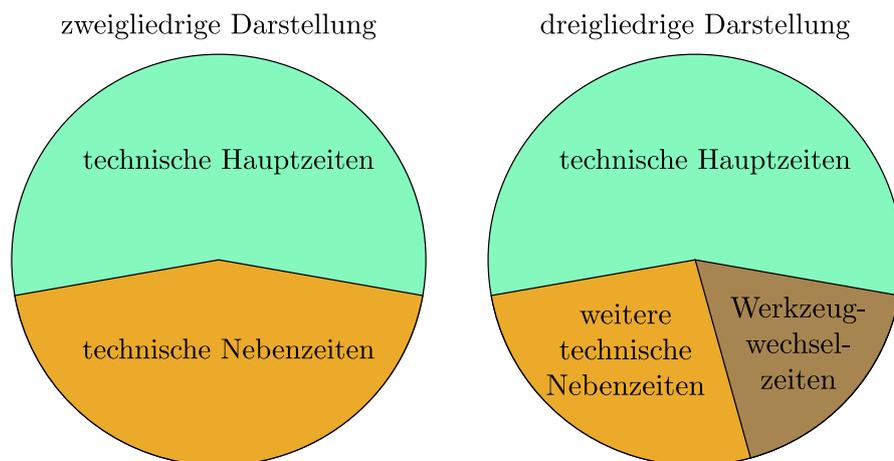


Abbildung 3.5: Stufe 1 der Darstellung technischer Nebenzeiten

Abbildung 3.6 zeigt die nächste Stufe der Darstellung technischer Nebenzeiten. Sie greift das Schema der ersten Stufe auf, detailliert dieses aber weiter. So erfolgt die Aufteilung nun nicht mehr nach dem Gesamtprozess sondern nach einzelnen Werkzeugen. Dabei besteht die zweite Stufe aus zwei getrennten Diagrammen: einer Darstellung in Prozent und einer in absoluten Zeiten. Damit soll verhindert werden, dass der Fokus sonst auf Werkzeuge fallen könnte, die zwar anteilig sehr große technische Nebenzeiten besitzen, absolut gesehen aber nur wenige Sekunden benötigen. Dieser Fall tritt unter anderem dann ein, wenn ein Werkzeug nur eine einzelne, sehr kurze Bearbeitung durchzuführen hat - beispielsweise einmaliges Vorbohren.

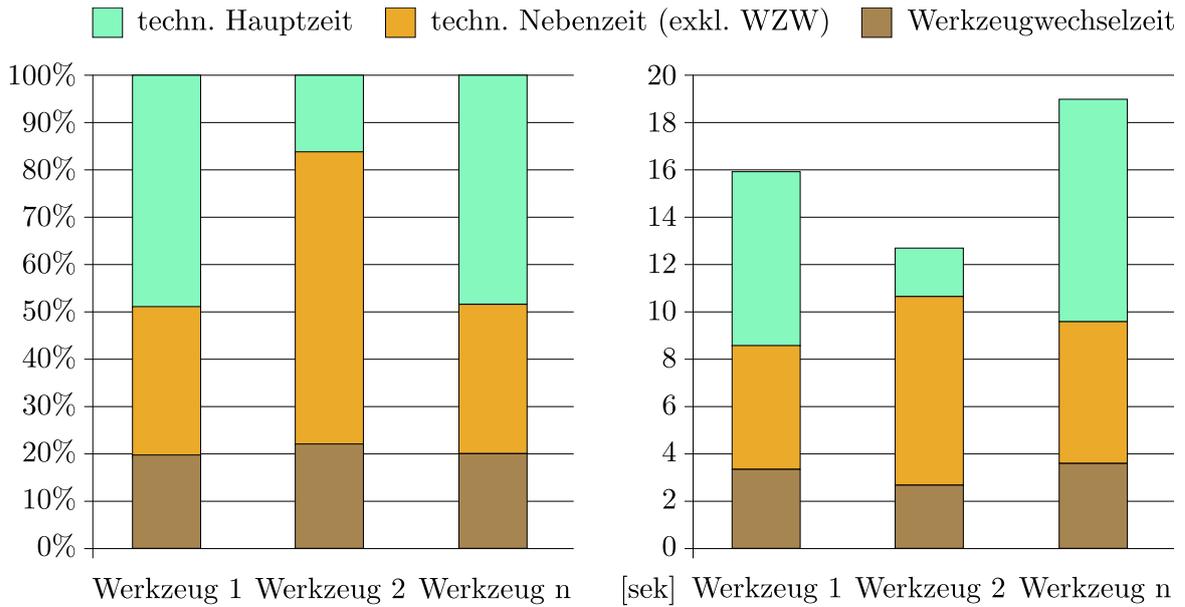


Abbildung 3.6: Stufe 2 der Darstellung technischer Nebenzeiten

CNC-Code	Zeit pro Zeile [sek]	Zeit pro Block [sek]
N10 Werkzeugwechsel auf Tool 1	3,47	3,47
N20 G4 F0.1	0,10	
N30 F=2000 S=10000 M3 G550	0,34	
N40 WAITP(YM)	1,21	
N50 G0 G64 X100 Y50 Z70	0,42	
N60 G0 G64 Z=50	0,24	
N70 M7	0,34	
N80 IF (MERKER==4)	0,10	
N90 G4 S20	0,12	
N100 G0 G64 T=0.5	0,23	3,10
N110 G1 G64 Z=-7 D2	0,31	
N120 G1 G64 Z=-10 D1 F1500	0,24	
N130 G1 G60 G601 Z=-15 F1000	0,14	0,69
N140 G0 Z=0.5 D1	0,26	
N150 G0 X=44.35 Y=112.3	0,47	
N160 G0 Z=0.5	0,23	0,96
N170 G1 Z-20 D2 F2000	0,47	0,47
N180 G0 Z=0.5 D1	0,26	
N190 M48	0,11	
N200 G0 G60 G603 Z300 M9	0,35	
N210 STOPRE	0,11	0,83
N220 Werkzeugwechsel auf Tool 2	3,54	3,54

Abbildung 3.7: Stufe 3 der Darstellung technischer Nebenzeiten

Die detaillierteste Darstellung technischer Nebenzeiten wird in Abbildung 3.7 aufgezeigt. Die Unterscheidung in technische Haupt- und Nebenzeiten erfolgt nun satzweise. Zwar werden hier einzelne NC-Sätze dargestellt, jedoch entspricht dies nicht dem vollständigen NC-Programm. NC-Befehle, welche keine oder eine zu geringe Ausführungszeit hervorrufen, werden nicht erfasst und können folglich auch nicht dargestellt werden (vgl. Kapitel 3.1.4). Um die Darstellung übersichtlicher zu gestalten, werden Blöcke technischer Hauptzeiten und Nebenzeiten gebildet und deren Zeiten aufsummiert. Einzig der Werkzeugwechsel wird auch hier als einzelne Zeile dargestellt, da die oftmals sehr langen Werkzeugwechselprogramme sonst die Übersicht stark einschränken würden und nur in sehr wenigen Fällen im Fokus einer Optimierung durch den Prozesseigner liegen.

3.2 Erfassung und Analyse anhand des NC-Programmarchivs

Neben der Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten durch eine Prozessbeobachtung ist dies auch anhand des NC-Programmarchivs möglich. Dieses Archiv, auch „Serieninbetriebnahmearchiv“ (Siemens 2013f, S. 323) oder „IndraWorks-Projekt“ (vgl. Bosch Rexroth 2010b, S. 281ff) genannt, dient zur Sicherung von Daten, zum Beispiel nach einer Inbetriebnahme oder vor dem Austausch einer Hardware-Komponente (Siemens 2013f, S. 319). Das NC-Programmarchiv kann aber auch an einem Computer geöffnet werden, um die darin befindlichen Dateien zu analysieren. Die Erfassungsmethoden und die dabei gewonnenen Daten unterscheiden sich jedoch in ihrer Art grundlegend von denen der Prozessbeobachtung. Während bei letzterer immer ein realer Fertigungsprozess betrachtet wird, erfolgt die Datengewinnung anhand des NC-Programmarchivs nur durch vorhandene NC-Programme. Im NC-Programmarchiv befinden sich unter anderem die NC-Bearbeitungsprogramme, Zyklen, Definitionen und die Steuerungsparametrierungsdatei (vgl. Abbildung 3.8).

Der wesentliche Vorteil dieser Erfassungs- und Analysemethode liegt in der Unabhängigkeit vom realen Fertigungssystem. Während bei einer Prozessbeobachtung die physische Präsenz und der Ablauf des Fertigungsprozesses zwingend notwendig ist, kann dies bei einer Erfassung und Analyse anhand des NC-Programmarchivs entfallen. Dies ist dann von großer Bedeutung, wenn das Fertigungssystem noch nicht in Betrieb genommen wurde oder noch gar nicht real existiert. Die Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten kann so zu einem deutlich früheren Zeitpunkt erfolgen.

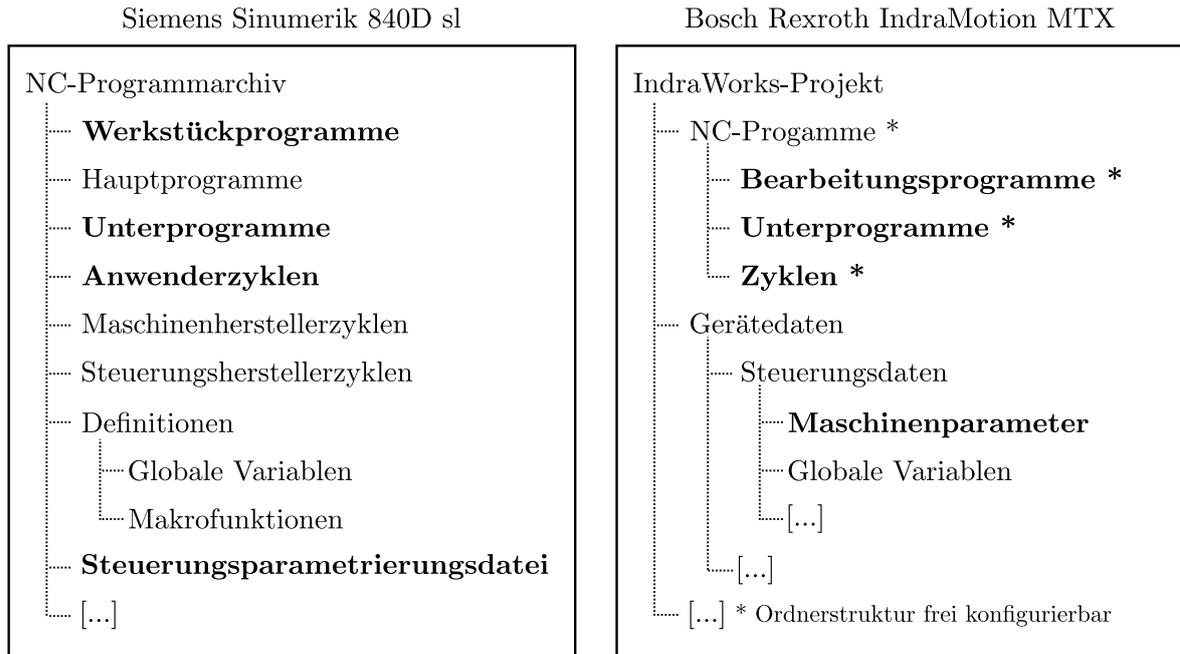


Abbildung 3.8: Aufbau eines NC-Programmarchivs der Siemens Sinumerik 840D (vgl. Siemens 2013g, S. 320) und eines IndraWorks-Projekts der Bosch Rexroth IndraMotion MTX (vgl. Bosch Rexroth 2010b, S. 281ff)

Viele Potenziale bei der Optimierung können so schon frühzeitig aufgedeckt werden. Jedoch besitzt diese Methode gegenüber der Prozessbeobachtung auch entscheidende Nachteile. Während bei einer Prozessbeobachtung die Dauer einzelner Schritte eindeutig zu bestimmen ist, erfolgt dies bei der Potenzialanalyse anhand des NC-Programmarchivs immer nur als Schätzung und ist somit nur schwer zu bewerten. Gerade die Auswirkung von Prozessschritten, welche durch das NC-Programm an Anweisungen oder Verzweigungen geknüpft sind, kann so nur vermutet werden. So erfolgt beispielsweise die Ausführung eines NC-Befehls in einer bedingten Anweisung nur dann, wenn die Bedingung erfüllt wurde. Das Aufzeigen nicht gehobener Potenziale kann deshalb immer nur ungefähr erfolgen.

Die für eine Potenzialanalyse notwendigen NC-Dateien sind das NC-Bearbeitungsprogramm, die darin verwendeten Unterprogramme und Zyklen wie auch die Steuerungsparametrierungsdatei. Sie werden nachfolgend genauer erläutert.

3.2.1 NC-Bearbeitungsprogramm

Die aus dem NC-Bearbeitungsprogramm zu gewinnenden Informationen für eine Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten sind vielfältig. Eine große Anzahl unterschiedlicher NC-Befehle wird für die Durchführung des Fertigungsprozesses verwendet, in NC-Sätzen miteinander kombiniert und mit Schleifen, Sprungmarken oder bedingten Anweisungen verknüpft.

Auch der Aufruf anderer NC-Programme, wie Unterprogramme und Zyklen, tritt häufig auf und lässt den Programmablauf für den Betrachter oftmals nicht mehr trivial erscheinen.

Moderne Steuerungen erlauben es mit ihren teilweise an eine Hochsprache angelehnten Programmiersprachen, Prozessschritte auf mehrere Arten zu programmieren (vgl. Kapitel 2.2.4). Das Fertigungsergebnis kann dabei unbeeinflusst bleiben, jedoch können durch die Wahl des jeweils richtigen NC-Befehls technische Nebenzeiten gering gehalten werden. Das Optimierungspotenzial gegenüber alternativen NC-Befehlen kann durch eine Vielzahl von Versuchen erkannt und bewertet werden. Werden möglichst alle im NC-Bearbeitungsprogramm verwendeten NC-Befehle analysiert und bewertet, so erhält der Anwender eine gute Übersicht über die Optimierungspotenziale zur Reduktion technischer Nebenzeiten, welche er durch den Tausch von NC-Befehlen heben könnte.

3.2.2 NC-Unterprogramme und -Zyklen

NC-Unterprogramme und -Zyklen unterscheiden sich in ihrer Handhabung für eine Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten nicht von einem NC-Bearbeitungsprogramm. Einzig ist zu beachten, dass sich ein zu hebendes Potenzial in einem NC-Unterprogramm oder -Zyklus mit der Anzahl der Aufrufe im NC-Bearbeitungsprogramm multiplizieren kann.

3.2.3 Steuerungsparametrierungsdatei

Viele CNCs besitzen eine Steuerungsparametrierungsdatei, welche alle Maschinen- und Settingdaten, die zur Parametrierung des CNC-Kerns notwendig sind, beinhaltet. Dazu gehören neben allgemeinen auch kanal- und achsspezifische Maschinen- und Settingdaten (Siemens 2013f, S. 165). Beispiele solcher CNCs sind eine Siemens Sinumerik 840D oder eine Bosch Rexroth IndraMotion MTX (vgl. Bosch Rexroth 2004). Viele der Parameter haben auch maßgeblichen Einfluss auf die technischen Nebenzeiten. Da sich eine Anpassung dieser Parameter auf die ganze Werkzeugmaschine auswirken und hieraus auch eine Schädigung derselben resultieren kann, ist eine Anpassung immer zuvor mit dem Maschinenhersteller zu besprechen. Da sich Werkzeugmaschinen und Fertigungsprozesse in ihrer Form sehr deutlich voneinander unterscheiden, kann für keinen Parameter ein allgemein gültiges Optimum ausgesprochen werden. Vielmehr ergibt sich dieses aus den spezifischen Anforderungen des Fertigungssystems. Auf eine Analyse und Anpassung der Steuerungsparametrierungsdatei wird nochmals in Kapitel 4.4.1 und 5.1.1 eingegangen.

3.2.4 Datenanalyse und -darstellung

Auch die Datenanalyse und -darstellung unterscheidet sich maßgeblich von der zuvor beschriebenen Erfassung und Analyse durch Prozessbeobachtung (vgl. Kapitel 3.1). Da eine Analyse des NC-Programmarchivs es größtenteils nicht erlaubt, einzelnen Prozessschritten und damit auch dem Gesamtprozess eine Dauer zuzuordnen, erfolgt die Analyse immer in Relation zu einem durch den Anwender definierten Optimum. Dieses Optimum kann darin bestehen, den NC-Befehl gänzlich zu vermeiden oder durch eine Alternative zu ersetzen. Zu Beginn der Analyse werden das Bearbeitungsprogramm wie auch die Unterprogramme und Zyklen satzweise nach NC-Befehlen durchsucht, welche im Allgemeinen zu vermeidbaren technischen Nebenzeiten führen könnten. Ein solcher typischer NC-Befehl ist die programmierte Wartezeit „G4“, welcher eine Dauer in Sekunden oder Spindelumdrehungen zugeordnet werden muss (vgl. Kapitel 4.4.4). Solche Befehle können in vielen Fällen gänzlich vermieden werden. Wird bei einer Siemens CNC durch die Datenanalyse ein „M17“ als Befehl für das Unterprogramm erkannt, kann dies zumeist durch den alternativen Befehl „RET“ ersetzt werden (vgl. Kapitel 4.4.5).

Anhand der Häufigkeit des NC-Befehls und seines optional zuvor ermittelten durchschnittlichen Zeitverlustes gegenüber dem jeweiligen Optimum kann ein Zeitverlust für diesen NC-Befehl im ganzen Bearbeitungsprogramm inklusive der Unterprogramme und Zyklen abgeschätzt werden. Diese Schätzung dient aber nur als Anhaltspunkt für Potenziale, welche möglicherweise zu heben sind. Denn nicht nur die NC-Programme, sondern auch die Werkzeugmaschine, die Werkzeuge und das Werkstück haben letztlich Einfluss auf den Gesamtprozess und somit auch auf das Optimierungsergebnis. Weiterhin ist zu beachten, ob die Verwendung eines vermeintlich suboptimalen NC-Befehls technisch begründet ist und eine Anpassung somit nicht durchgeführt werden kann. Eine ähnliche Analyse kann für die Steuerungsparametrierungsdatei erfolgen. Auch hier wird die Datei satzweise nach wichtigen Maschinenparametern durchsucht. Wie zuvor beschrieben, kann keinem Parameter ein allgemein gültiges Optimum zugewiesen werden, in Bezug zum Fertigungsprozess können aber Optimierungspotenziale erkannt und aufgezeigt werden. Weiterhin erlaubt die Analyse der Steuerungsparametrierungsdatei, auch maschinenspezifische Parameterwerte geordnet aufzuzeigen. Dies erleichtert die Anwendung einiger Verfahren zur Optimierung technischer Nebenzeiten erheblich (vgl. Kapitel 4.3.1). Auch können durch die Erfassung und Analyse einzelner Parameter Optimierungsverfahren automatisiert werden (vgl. Kapitel 5.1.2).

Die aufzuzeigenden Parameter und gewonnenen Optimierungspotenziale werden in einem Protokoll zusammengefasst. Ziel dieser Darstellung ist es, den Fokus des Anwenders auf die größten Potenziale zu lenken sowie Anmerkungen und Hilfen für eine anknüpfende Optimierung der technischen Nebenzeiten zu geben. Der Ablauf einer solchen Datenanalyse ist in Abbildung 3.9 zusammengefasst.

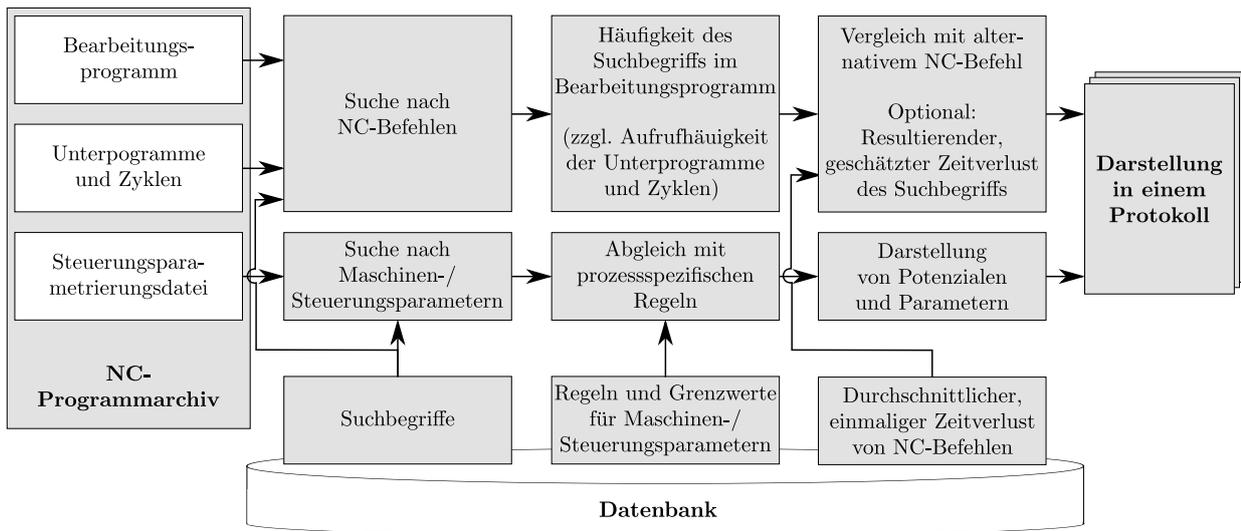


Abbildung 3.9: Ablaufdiagramm einer Analyse anhand des NC-Programmarchivs

3.3 Erfassung und Analyse mit Hilfe einer CNC-Bearbeitungssimulation

Die CNC-Bearbeitungssimulation stellt ein weiteres Verfahren zur Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten dar. In diesem Kapitel werden drei Arten einer CNC-Bearbeitungssimulation vorgestellt und bewertet: die CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern, die CNC-Bearbeitungssimulation mit einer CNC als Hardware-in-the-Loop und die CNC-Bearbeitungssimulation mit Software-in-the-Loop. Diese Form der Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten kann weder eindeutig den beobachtenden Verfahren noch dem Verfahren der NC-Programmarchivanalyse zugeordnet werden. Vielmehr bildet sie den Brückenschlag zwischen beiden Verfahrensgruppen. Bei der CNC-Bearbeitungssimulation wird - neben der Maschinenlogik und den 3D-Modellen von Maschine, Werkstück, Werkzeugen und Spannvorrichtung - ebenfalls das NC-Programmarchiv benötigt. Mit diesen Komponenten wird es möglich, den Prozess an einem Computer zu visualisieren und damit auch zu beobachten. Im Gegensatz zu den anderen beobachteten Verfahren muss der Fertigungsprozess dabei aber nicht real existieren. Eine Analyse kann somit schon weit vor der eigentlichen Inbetriebnahme erfolgen und den Fertigungsprozess auch nicht beeinflussen. Insbesondere bei einem Hardware-in-the-Loop-System ist auch die Verknüpfung mit anderen technischen Systemen, wie Ladeportal oder Leitrechner, möglich (vgl. Salinas und Klemm 2009). Doch auch die verschiedenen Ausprägungen der CNC-Bearbeitungssimulation weisen gegenüber anderen Verfahren zur Potenzialanalyse deutliche Nachteile auf. So müssen für sie jeweils immer die 3D-Modelle von Werkzeugmaschine, Werkstück, Werkzeuge und Spannsystem vorliegen. Ein für die Simulation notwendiges kinematisches

Modell der Werkzeugmaschine muss ebenfalls angelegt werden. Weiterhin gilt zu beachten, dass Schwankungen im realen Fertigungsprozess durch Umgebungseinflüsse, Verschleiß und Werkstücktoleranzen nicht abgebildet werden. Dies ist insbesondere bei der Programmierung des Sicherheitsabstandes von großer Bedeutung (vgl. Kapitel 4.1). Die in dieser Arbeit vorgestellten Arten der CNC-Bearbeitungssimulation unterscheiden sich in ihrem Aufbau, in der Durchführung und den sich ergebenden Vor- und Nachteilen sehr deutlich voneinander. Sie werden deshalb nachfolgend detailliert beschrieben.

3.3.1 CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern

Neben den in Kapitel 2.4.4 beschriebenen CAD-CAM-Systemen gibt es viele verschiedene CNC-Bearbeitungssimulationen auf dem Markt. So vertreibt die Siemens AG das Produkt „Tecnomatix RealNC“, welches der Analyse und Optimierung von NC-Programmen dienen soll (vgl. Siemens 2015b). Mit diesem Programm ist es möglich, technische Nebenzeiten automatisiert zu erfassen. Während der Simulation des Fertigungsprozesses werden anhand genutzter Befehle und den Zeitpunkten der Bauteilberührung durch das Werkzeug die technischen Haupt- und Nebenzeiten bestimmt und addiert. Dabei werden bei den technischen Nebenzeiten Zeiten zum Positionieren, Schleppen, Verzögern und Warten getrennt erfasst und zu einer gesamten technischen Nebenzeit zusammengefasst. Wird bei der Simulation zusätzlich auch der Materialabtrag simuliert, so erfolgt auch eine automatische Trennung der technischen Hauptzeit in Zeiten des Eingriffs und des „Luftschnitts“. Folgt man der in Kapitel 2.1 getroffenen Definition, so müssten eigentlich Zeiten, zu denen ein Luftschnitt stattfindet, auch den technischen Nebenzeiten zugeschrieben werden. Dieses Detail ist besonders im Hinblick auf den programmierten Sicherheitsabstand wichtig. Dieser kann so einfach ermittelt und Optimierungspotenziale erkannt werden.

Neben den zuvor beschriebenen Vorteilen besitzt die CNC-Bearbeitungssimulation noch weitere: Die Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten kann für jeden NC-Satz einzeln erfolgen, Änderungen im NC-Programm können sehr leicht eingepflegt und im Programmablauf kann manuell vor- und zurückgesprungen werden. Dagegen steht eine Reihe von Nachteilen, welche im individuellen Einsatzfall mit den Vorteilen abzuwägen sind. Die aktuell zur Verfügung stehenden CNC-Bearbeitungssimulationen bieten oftmals keine genaue Abbildung des CNC-Kerns. Die Funktionalität einer echten CNC wird in vielen Fällen nur sehr grob nachgebildet. So stehen nicht alle NC-Befehle zur Verfügung, welche sonst auf einer echten CNC genutzt werden könnten. Dies ist besonders in Bezug zur Optimierung technischer Nebenzeiten nachteilig, da es dort vielmals ratsam ist, NC-Befehle außerhalb des „Standardrepertoires“ zu verwenden (vgl. Kapitel 4). Auch wird in den meisten CNC-Bearbeitungssimulationen nur ein kleiner Teil der Steuerungsparametrierung herangezogen.

Dies führt besonders bei der Dynamikparametern zu einer Abweichung von der Realität, welche nicht immer tolerierbar ist (vgl. Kapitel 4.3).

3.3.2 CNC-Bearbeitungssimulation mit Hardware-in-the-Loop

Die Verwendung einer CNC als Hardware-in-the-Loop (HIL) stellt ein weiteres Verfahren zur Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten dar. Wie auch bei der CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern werden NC-Programme, 3D-Modelle und der kinematische Aufbau genutzt, um einen Fertigungsprozess zu simulieren und zu visualisieren (vgl. ISG 2014). Durch die Miteinbeziehung einer echten CNC ergeben sich wiederum spezifische Vor- wie auch Nachteile. Im Gegensatz zur CNC-Bearbeitungssimulation kommt hier keine Abbildung eines CNC-Kerns zur Anwendung, sondern die reale Steuerung mit ihrem CNC-Kern und allen Parametern. Dies führt dazu, dass alle NC-Befehle genutzt werden können und die CNC bei Fehlern das gleiche Verhalten wie im realen Fertigungsprozess zeigt. Jedoch sind bei der HIL Grenzen gesetzt. Eine fehlende Hardware muss auch hier nachgebildet werden. Dies kann insbesondere bei Hilfsfunktionen nur zu einem groben Abbild führen, da diese bei einer realen Werkzeugmaschine an eine Speicherprogrammierbare Steuerung weitergegeben werden (vgl. Kapitel 4.4.3). Zusätzlich ist zu beachten, dass für eine möglichst genaue Nachbildung des Fertigungsprozesses der Hard- und Softwarestand der CNCs dem des realen Fertigungsprozesses entsprechen sollte. Dies kann aber nicht immer garantiert werden, da künftige Fertigungssysteme mit einer neuen, noch nicht verfügbaren Steuerungsgeneration ausgestattet sein könnten.

In Abbildung 3.10 ist der prinzipielle Aufbau einer CNC als Hardware-in-the-Loop dargestellt. Dabei wird die CNC über einen Feldbus mit einem Simulationscomputer verbunden. Dieser bildet das Maschinenverhalten ab und visualisiert den Fertigungsprozess.

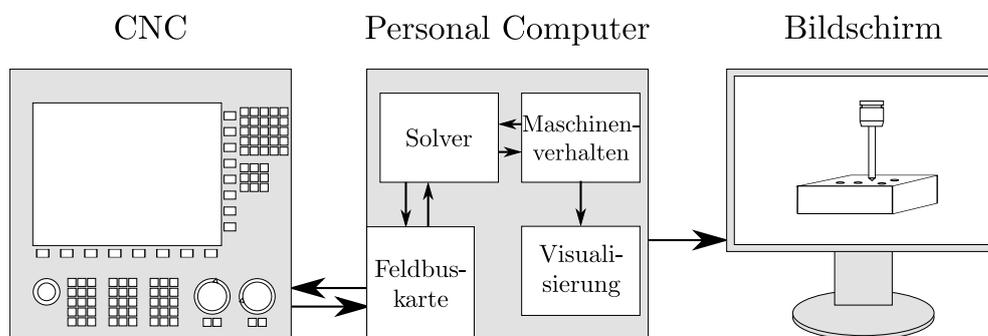


Abbildung 3.10: Darstellung der Funktionsweise einer CNC-Bearbeitungssimulation mit CNC als Hardware-in-the-Loop (vgl. ISG 2014, S. 4)

3.3.3 CNC-Bearbeitungssimulation mit Software-in-the-Loop

Die dritte vorgestellte Form einer CNC-Bearbeitungssimulation erfolgt unter Nutzung einer Software-in-the-Loop (SIL, vgl. Glöckler 2014). Durch die Integration der Software des CNC-Kerns in eine CNC-Bearbeitungssimulation ist es möglich, das Verhalten einer CNC genauer abzubilden. Im Gegensatz zu CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern könnten damit alle NC-Befehle und Parameter einer realen CNC genutzt werden. Der Mehraufwand einer Simulation mit Hardware-in-the-Loop-System wäre damit nicht mehr unbedingt notwendig. So verspricht die Siemens AG mit ihrem „Virtuellem NC-Kern (VNCK)“ unter Anderem eine sehr genaue Taktzeit, eine hohe Genauigkeit der Werkzeugbahn und die volle Verfügbarkeit der NC-Befehle einer Sinumerik 840D (vgl. Siemens 2011). Doch auch hier gilt, dass der CNC-Bearbeitungssimulation mit Software-in-the-Loop Grenzen gesetzt sind, da das reale Verhalten einiger Komponenten der Werkzeugmaschine nur ungefähr oder gar nicht abgebildet wird.

3.3.4 Prozessdatenanalyse und -darstellung

Die entscheidende Stärke der CNC-Bearbeitungssimulation liegt in der Prozessdatendarstellung. Durch eine Visualisierung des Fertigungsprozesses, welcher verlangsamt, beschleunigt und aus beliebiger Richtung betrachtet werden kann, wird es möglich, Prozessschritte und damit auch technische Nebenzeiten zu erkennen, wie es durch eine visuelle Beobachtung der realen Werkzeugmaschine nicht möglich gewesen wäre. Da während der Visualisierung des Fertigungsprozesses auch immer der aktuell gültige NC-Satz gezeigt wird, kann eine Verknüpfung zwischen Ursache und Wirkung erfolgen. Neben der automatisierten Prozessdatenanalyse und -darstellung durch einige CNC-Bearbeitungssimulationen ist es prinzipiell auch möglich, weitere Verfahren der Prozessbeobachtung zu nutzen. Dies gilt insbesondere für die CNC-Bearbeitungssimulation mit einer CNC als Hardware-in-the-Loop oder einem CNC-Kern als Software-in-the-Loop. Auch hier können Diagnosefunktionen, Protokollierzyklen und Fernzugriff nutzbar sein.

3.4 Vergleichendes Beispiel

Das nachfolgend behandelte Beispiel eines ausgeführten Programmsegments in einer CNC-Werkzeugmaschine soll zeigen, dass mit Hilfe der unterschiedlichen Verfahren der Potenzialanalyse auch verschiedene Erkenntnisse zu technischen Nebenzeiten gewonnen werden können. Während manche NC-Sätze eindeutig in ihrer Ausführung zu beobachten sind, können andere Sätze nur durch eine Analyse des NC-Programms erkannt werden. Auch

die Ausführungsdauer einzelner NC-Sätze kann unterschiedlich genau oder möglicherweise gar nicht bestimmt werden. In Tabelle 3.1 sind die gewonnenen Erkenntnisse aus den verschiedenen Verfahren zur Potenzialanalyse dargestellt.

Tabelle 3.1: Beispielhafte Erkenntnisse zu technischen Nebenzeiten durch die Anwendung der verschiedenen Verfahren

Ausgeführter NC-Code an einer WZM	Visuelle Beobachtung	Fernzugriff via OPC	Diagnosefunktionen	Protokollierzyklen	NC-Programmanalyse	CNC-Bearbeitungssimulation
RTP=3 DP1=-20	-	-	-	Protokollierung nur über einen längeren Zeitraum sinnvoll durchführbar (Werkzeug oder Takt)	Variablen-deklaration	-
G0 G60 G603 Z=RTP	Eilgang aus Bohrung heraus	NC-Satz + Dauer	Spindellast nimmt ab		Genauhalt programmiert	-
G0 G60 G603 X10 Y10	Eilgang zu Zielbohrung	NC-Satz + Dauer	Lageistwert X, Y		Geradeninterpolation + Eilgang	Abstand zum Bauteil ausreichend
G0 G64 Z=RTP-2	Eilgang auf Vorposition	NC-Satz + Dauer	Übergang Geschwindigkeit in Z		Übergang mit Bahnsteuerbetrieb	Vorposition zu entfernt
G1 G60 G601 Z=DP1	Bohren mit Vorschub	NC-Satz + Dauer	Spindellastanstieg verspätet		Vorschub + Genauhalt	-
STOPRE	-	-	-		Satzvorlaufstopp	wird ggf. nicht interpretiert

3.5 Erste Bewertung und Fazit

Ausgehend von der visuellen Prozessbeobachtung bis hin zur CNC-Bearbeitungssimulation mit Software-in-the-Loop wurden insgesamt acht verschiedene Verfahren zur Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten vorgestellt. Sie besitzen alle ihre individuellen Vor- und Nachteile, welche je nach Anwendungsfall mehr oder weniger an Bedeutung gewinnen. Zusammenfassend werden die wichtigsten Eigenschaften benannt, um die Grundlage für eine erste Bewertung und ein Fazit zu schaffen.

Die visuelle Beobachtung und die damit verbundene Videoanalyse bestehen zwar durch ihre einfache Durchführbarkeit und die Möglichkeit, Dinge zu erkennen, die nicht direkt durch das NC-Programm verursacht sind, jedoch gestaltet sich eine Auswertung oftmals als äußerst aufwendig. Die als zweites beschriebenen Diagnosefunktionen können entweder als einfaches Erfassungswerkzeug genutzt werden, welches schnell Auskunft über die Anteile technischer Nebenzeiten im Gesamtprozess gibt, oder als ein sehr umfangreiches und komplexes Werkzeug, welches das Auslesen vieler weiterer Zustandsdaten in höchster Detaillierung ermöglicht. Auch die nachfolgend beschriebenen Protokollierzyklen erlauben es, anhand aufgezeichneter Zustandsvariablen technische Nebenzeiten für jedes Werkzeug automatisiert zu erfassen und zu protokollieren. Doch neben dem beschränkten Detaillierungsgrad in der Erfassung ist auch die deutliche Verlangsamung des Fertigungsprozesses

bei den Protokollierzyklen negativ zu bewerten. Das letzte der beobachtenden Verfahren stellt der Fernzugriff dar. Er bietet den maßgeblichen Vorteil, für eine Erfassung nicht mehr vor Ort sein zu müssen. Doch ist hier der Detaillierungsgrad durch Beschränkungen in der Aktualisierungsrate der Zustandsdaten als wesentlicher Nachteil zu sehen. Außerdem wurde an die Beobachtungsverfahren anknüpfend ein dreistufiges Analyse- und Darstellungsverfahren vorgestellt, welches sich je nach gewünschtem Detaillierungsgrad ausführen lässt.

Den beobachtenden Verfahren steht die Erfassung und Analyse technischer Nebenzeiten mit Hilfe des NC-Programmarchivs gegenüber. Hier kann schon ohne die Existenz des realen Fertigungssystems und damit weit vor einer Inbetriebnahme ein Fertigungsprozess auf Optimierungspotenziale untersucht werden. Dies geschieht anhand drei wesentlicher Programmgruppen: dem Bearbeitungsprogramm, den darin aufgerufenen Zyklen und Unterprogrammen sowie der Steuerungsparametrierungsdatei. Hierdurch können Potenziale durch die ungünstige Wahl von NC-Befehlen beziehungsweise durch die prozessspezifisch suboptimale Parametrierung der Steuerung erkannt und Verbesserungsvorschläge gemacht werden. Jedoch sind die Auswirkungen auf den Realprozess nicht direkt zu bestimmen sondern immer nur schätzbar.

Die Verbindung zwischen den Verfahrensgruppen der Prozessbeobachtung und Analyse des NC-Programmarchivs stellt die CNC-Bearbeitungssimulation dar. Auch sie zieht das NC-Programmarchiv für die Simulation heran, bietet durch die Visualisierung des Fertigungsprozesses aber auch die Möglichkeit der visuellen Beobachtung. Einzelne Prozessschritte können so beliebig oft beobachtet und ohne Gefahr eines Unfalls optimiert werden. Doch durch das Fehlen einer genauen Steuerungsabbildung ist es mit einer CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern zumeist nicht möglich, den ganzen Befehlsumfang der NC-Sprache zu nutzen. Durch die Integration des CNC-Kerns als Software-in-the-Loop kann dieser Umstand beseitigt werden. Die CNC-Bearbeitungssimulation mit HIL ist durch die physische Präsenz der CNC immer auch auf diese beschränkt. Ein schneller Wechsel auf eine andere Steuerungsgeneration oder einen anderen Hersteller ist damit nicht möglich.

Eine konkrete und allgemein gültige Empfehlung für eines dieser vorgestellten Verfahren kann nicht gegeben werden. Vielmehr muss der Anwender anhand der beschriebenen Vor- und Nachteile immer abwägen, welches Verfahren zur Erfassung und Analyse sich am besten für seinen Anwendungsfall eignet. Mit all den zuvor genannten Verfahren ist es aber möglich, Optimierungspotenziale zu erkennen. Wie diese Potenziale zu heben sind, wird im nachfolgenden Kapitel „Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten“ vorgestellt. Eine vollständige Bewertung der Potenzialanalyseverfahren erfolgt in Kapitel 7, bei der noch die Möglichkeiten einer Integration in die Prozessplanung und das Fertigungssystem sowie die Ergebnisse der Beispiele einer Validierung mit einfließen.

4 Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten

Die Optimierungspotenziale, welche durch die Potenzialanalyse erkannt wurden, sollen in einem nächsten Schritt zielgerichtet und mit größter Effektivität gehoben werden. Aufbauend auf den vorherigen Kapiteln wurde deshalb die „Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten“ entwickelt. Einige der nachfolgend aufgezeigten Verfahren werden schon in der Industrie in Teilen oder im Ganzen angewandt und sind somit dem Stand der Technik zuzurechnen. Jedoch wurden im Rahmen dieser Arbeit auch zusätzliche neue Verfahren entwickelt und bestehende angepasst oder erweitert. All diese Verfahren haben gemein, dass sie ungeordnet kaum effektiv angewandt werden können. Ziel dieser neu geschaffenen Methode ist deshalb auch die klare Strukturierung aller zur Verfügung stehender Verfahren in thematisch geordnete Teilbereiche.

Die Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten gliedert sich insgesamt in acht Teilbereiche, welche das ganze Spektrum der durch NC-Programme gegebenen Beeinflussungsmöglichkeiten moderner CNCs aufzeigen sollen. Die nachfolgende Reihenfolge der acht Bereiche orientiert sich zwar an ihrer Bedeutung für die Optimierung aller technischen Nebenzeiten, jedoch kann diese Reihenfolge je nach Anwendungsfall auch differieren. Um die für den jeweiligen Fertigungsprozess geltende Reihenfolge bestimmen zu können, wurde im vorherigen Kapitel die Potenzialanalyse behandelt (vgl. Kapitel 3).

Die drei wichtigsten Teilbereiche bei der Optimierung technischer Nebenzeiten sind der programmierte Sicherheitsabstand zwischen Werkstück und Werkzeug, die Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen und die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs. Aber auch die anderen fünf Teilbereiche sind für eine Optimierung bedeutsam. Eine für einen Anwendungsfall erfolgte Potenzialanalyse kann diese Teilmethoden in ihrer Wichtigkeit auch über die drei anderen stellen. Diese Teilbereiche behandeln die Steuerungsparametrierung, die anforderungsgerechte Parametersatzanwahl, Hilfsfunktionen, Wartemarken und die Kanalsynchronisation, wie auch NC-Satzvorlauf und Programmvorverarbeitung. Auf alle acht Bereiche wird nachfolgend detailliert eingegangen.

4.1 Programmierter Sicherheitsabstand

Eine Prämisse bei der Programmierung eines NC-Bearbeitungsprogramms lautet, Kollisionen in der Werkzeugmaschine zu vermeiden. Denn Kollisionen führen in leichten Fällen zur Beschädigung von Werkstück und Werkzeug, aber in schweren Fällen auch zur Beschädigung der Maschine. Dies bedeutet im Allgemeinen eine lange Ausfallzeit und einen großen wirtschaftlichen Schaden. Einerseits ist es durch eine sorgfältige Programmerstellung und eine CNC-Bearbeitungssimulation sehr gut möglich, Kollisionen zu vermeiden, andererseits können nicht alle Aspekte der Realität durch eine CNC-Bearbeitungssimulation abgebildet werden (vgl. Kapitel 3.3). Insbesondere zählen hierzu die Schwankungen im Fertigungsprozess. So variieren Bauteilmaße innerhalb ihrer Toleranzen, Werkzeuge und Maschinenkomponenten unterliegen dem Verschleiß und auch Umgebungseinflüsse tragen dazu bei, dass der Fertigungsprozess in jedem Takt etwas differiert. Hierdurch schwankt auch der Abstand des Werkzeugs zum Werkstück bei Verfahrbewegungen (vgl. Kapitel 4.3) und beim Übergang in eine definierte Vorschubgeschwindigkeit. Deshalb muss diesem Abstand eine Sicherheit aufgeschlagen werden. Dies wird gemeinhin als „programmierter Sicherheitsabstand“ bezeichnet. Betrachtet man ein Bearbeitungsprogramm aus der Großserienfertigung, so sieht man viele unterschiedliche Werte. Es gibt programmierte Sicherheitsabstände, die programmglobal, werkzeugglobal oder nur einmalig für eine spezifische Bearbeitung gelten. Die Gründe hierfür sind nicht immer eindeutig zu bestimmen. Da aber gerade über den Stellhebel des programmierten Sicherheitsabstandes ein deutliches Potenzial bei den technischen Nebenzeiten zu heben ist, wird es eminent wichtig, sowohl Ursache als auch Wirkung des programmierten Sicherheitsabstandes zu kennen. Deshalb finden sich nachfolgend Erläuterungen zu den Einflussfaktoren auf den realen Abstand zwischen Werkzeug und Werkstück sowie auf das NC-Programm.

Der Einfluss des programmierten Sicherheitsabstands auf die Taktzeit des Fertigungsprozesses wurde anhand von vier Beispielen untersucht. Die in Abbildung 4.1 dargestellten Diagramme zeigen alle das Verhältnis zwischen der Reduktion des programmierten Sicherheitsabstands und der damit einhergehenden Verringerung der Gesamttaktzeit der Werkzeugmaschine. Bei den Diagrammen (1), (2) und (3) handelt es sich jeweils um das gleiche Bearbeitungszentrum, aber mit unterschiedlichen Fertigungsprozessen und NC-Programmen. Diagramm (4) zeigt das Ergebnis an einem weiteren Bearbeitungszentrum. Die NC-Programme, welche alle in der Großserienproduktion eingesetzt werden, wurden so angepasst, dass der programmierte Sicherheitsabstand um einen bestimmten Betrag verkleinert werden kann. Da die verschiedenen NC-Programme eine stark abweichende Anzahl an Positionen haben (zwischen 150 und 350), an welchen der programmierte Sicherheitsabstand verändert werden kann, wurde die durchschnittliche Zeitreduktion je angepasstem Sicherheitsabstand für die Darstellung gewählt. Die so angepassten NC-Programme wurden in einer CNC-

Bearbeitungssimulation mit verschiedenen Werten für den Sicherheitsabstand durchlaufen. Da die NC-Programme schon programmierte Sicherheitsabstände von deutlich unter fünf Millimetern aufweisen, wurden diese maximal um zwei Millimeter reduziert. Anschließend wurde jeweils eine Regressionsgerade durch die Messergebnisse gelegt.

Zwei entscheidende Erkenntnisse können aus dieser Versuchsreihe gewonnen werden:

- Die Messergebnisse können sehr gut durch eine Regressionsgerade angenähert werden. Folglich kann auch eine Proportionalität zwischen Gesamttaktzeit und Reduktion des programmierten Sicherheitsabstandes angenommen werden.
- Die Steigungen der Regressionsgeraden sind sehr unterschiedlich. Es kann somit keine pauschale Aussage über die Effektivität der Reduktion des programmierten Sicherheitsabstandes gegeben werden.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass durch die Verringerung des programmierten Sicherheitsabstandes ein entscheidender Stellhebel zur Reduktion technischer Nebenzeiten zur Verfügung steht. Im Falle der zuvor gezeigten vier Beispiele ergibt sich eine Taktzeitreduktion von durchschnittlich 1,3 Prozent je reduziertem Millimeter. Welcher programmierte Sicherheitsabstand aber nun zu empfehlen ist, hängt von vielen Einflussfaktoren ab. Diese werden im folgenden Abschnitt behandelt und bewertet.

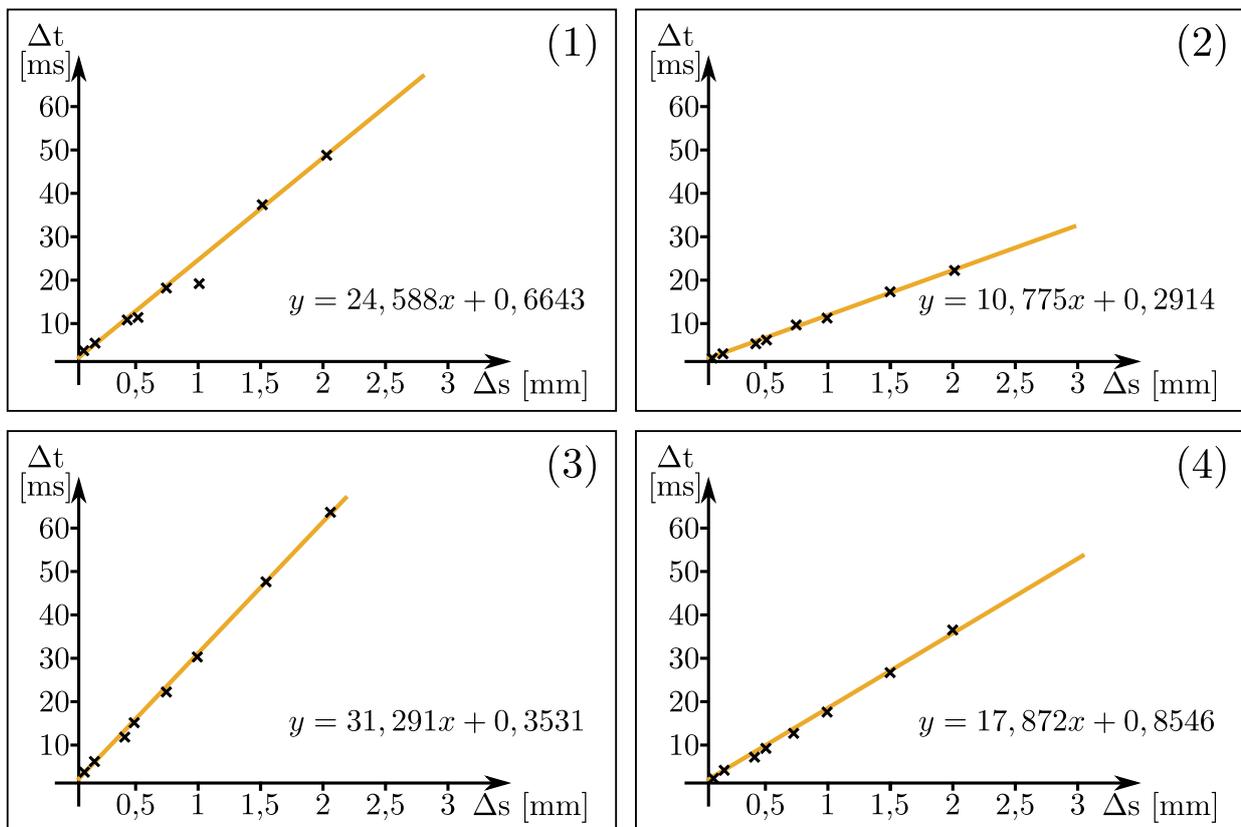


Abbildung 4.1: Verhältnis zwischen reduziertem Sicherheitsabstand und Reduzierung der Fertigungszeit inklusive Regressionsgerade

4.1.1 Einflussfaktoren auf den realen Abstand

Die Einflüsse auf eine Fertigung und damit auch auf den realen Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug können sehr vielfältig sein. Um eine geordnete Übersicht der Einflussfaktoren erhalten zu können, eignet sich eine Darstellung im Ishikawa-Diagramm sehr gut (vgl. Syska 2006, S. 64). Die in Abbildung 4.2 dargestellten Gruppen verschiedener Einflussfaktoren folgen dabei den „6 M“.

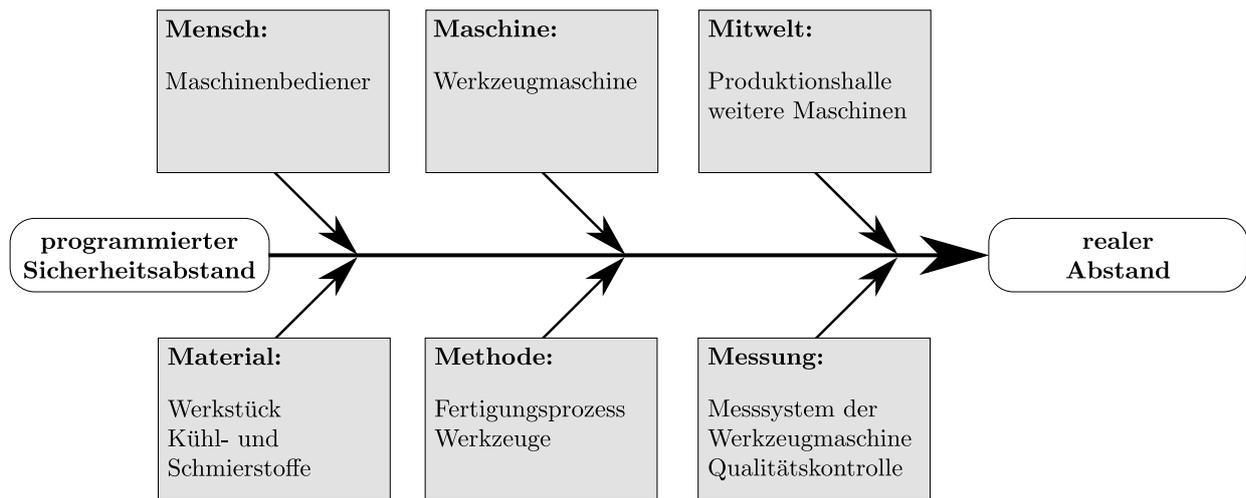


Abbildung 4.2: Ishikawa-Diagramm der Einflüsse auf den realen Abstand zwischen Werkzeug und Werkstück

Die erste Gruppe beschreibt die Gesamtheit menschlicher Einflüsse auf den realen Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug. Da eine Beeinflussung eines vollautomatisierten Fertigungsprozesses in einer Werkzeugmaschine kaum mehr durch einen Menschen möglich ist, reduziert sich dieser Faktor auf Fehler bei der Eingabe von Werten in NC-Programmen und Korrekturtabellen. Eine Fehleingabe, wie zum Beispiel ein „Zahlendreher“, könnte aber durch eine Vergrößerung des programmierten Sicherheitsabstandes niemals zuverlässig kompensiert werden. Solche Fehler müssen durch Plausibilitätsabfragen im NC-Programm oder der CNC vermieden werden. Die zweite Gruppe zeigt die Werkzeugmaschine mit all ihren Komponenten. Wie jedes technische System weisen auch die Komponenten einer Werkzeugmaschine Fertigungstoleranzen auf. Hinzu kommen weitere Einflüsse wie Lagerspiele, Temperaturexpansion oder Verschleiß. Die Abweichungen bei einer modernen Werkzeugmaschine in der Positionierung ihrer Achsen liegen durch Kompensationsmechanismen aber nur bei wenigen Mikrometern (vgl. GROB-Werke 2011, S. 13). Auch die Mitwelt hat als weitere Gruppe Einfluss auf den Fertigungsprozess und damit auf den Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug. Andere Maschinen können durch ihre Bewegungen Schwingungen auslösen, welche sich über den Hallenboden auf andere Maschinen übertragen. Auch die Umgebungstemperatur oder Hitzestrahlung können den Fertigungsprozess beeinflussen.

Auch hier wird versucht, diese Einflüsse weitgehend zu minimieren - beispielsweise durch die Nutzung von Klimaanlage und Schwingungsdämpfern. Die Einflüsse einer Messung können prinzipiell in zwei Faktoren aufgeteilt werden: Die Ungenauigkeit der Messsysteme in der Werkzeugmaschine selbst und die des Messsystems bei der Qualitätskontrolle, welche mit den zurückgemeldeten Korrekturwerten wieder in den Fertigungsprozess gelangen. Sie betragen in modernen Systemen aber jeweils maximal wenige Mikrometer. In der fünften Gruppe, der Methode, sind der Fertigungsprozess und die Werkzeuge zusammengefasst. Auch hier kann durch verschiedene Werkzeuge und den auftretenden Verschleiß der reale Abstand beeinflusst werden. Jedoch bewegen sich die Abweichungen auch hier bei wenigen Mikrometern und der Werkzeugverschleiß führt tendenziell zu einer Vergrößerung des realen Abstandes. Der letzten Gruppe der Einflussfaktoren ist wohl die größte Bedeutung zuzuschreiben. Das Material und damit im Wesentlichen das Werkstück beeinflussen den realen Abstand am meisten. Der programmierte Sicherheitsabstand muss an die vorliegenden Fertigungstoleranzen wie auch an Span- und Gratbildung angepasst werden. Dabei kann die Fertigungstoleranz bei nicht bearbeiteten Gusskonturen mehrere Millimeter betragen.

Durch die Betrachtung der Einflussfaktoren auf den realen Abstand zwischen Werkstück und Werkzeug hat sich gezeigt, dass vor allem die Fertigungstoleranz maßgeblich ist. Alle anderen Einflüsse sind hingegen im Verhältnis dazu sehr klein. Diese können aber nicht einfach vernachlässigt werden, sondern sollten in einem Summand zusammengefasst werden. Eine explizite Wertzuweisung muss aber prozessspezifisch erfolgen. Um die Programmierung und Lesbarkeit des NC-Programms nicht deutlich zu verschlechtern, ist es sinnvoll, dass der resultierende, programmierte Sicherheitsabstand auf einen ganz- oder halbzahligen Wert aufgerundet wird. Aus dieser Betrachtung können folgende Beispiele anhand dreier ausgewählter Bearbeitungsstände einer Oberfläche am Werkstück abgeleitet werden:

Tabelle 4.1: Werkstückabhängige Beispiele für den zu programmierenden Sicherheitsabstand

Bearbeitungsstand der Oberfläche	Fertigungstoleranz	weitere Einflüsse	etablierter Standard	vorgeschlagener Standard
unbearbeitet	2,0 mm	0,2 mm	3,0 mm	2,5 mm
vorbearbeitet	0,5 mm	0,2 mm	1,0 mm	1,0 mm
fertigbearbeitet	0,3 mm	0,2 mm	0,5 mm	0,5 mm

Die aus dieser Betrachtung ermittelten Sicherheitsabstände entsprechen im Wesentlichen den etablierten Erfahrungswerten der betrachteten Großserienfertigung. Diese Erfahrungswerte wurden auch schon als zu programmierender Standard in die CAD-CAM-Systeme integriert. Bei Betrachtung der programmierten Sicherheitsabstände in NC-Programmen in der Großserienfertigung fällt aber auf, dass in vielen Fällen die Standards nicht mehr eingehalten werden. Die Gründe hierfür werden nachfolgenden erläutert.

4.1.2 Einflussfaktoren auf den programmierten Sicherheitsabstand

Auch der programmierte Sicherheitsabstand wird während des Entstehungs- und Anpassungsprozesses des NC-Bearbeitungsprogramms vielfach beeinflusst. Anhand der in Abbildung 4.3 dargestellten Prozesskette für die Entstehung eines NC-Programms können vier Einflusszeitpunkte identifiziert werden. Zu Beginn der Entstehung eines NC-Programms wird im CAD-CAM-System ein Standard für die programmierten Sicherheitsabstände definiert und hinterlegt. Dieser Standard findet bei der automatischen Programmgenerierung durch das CAD-CAM-System Beachtung. Anschließend wird dieses generierte, universelle Bearbeitungsprogramm durch einen Postprozessor in ein steuerungsspezifisches NC-Programm übersetzt. Hierbei kann es vorkommen, dass der Postprozessor in wenigen Fällen keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert. Es muss deshalb ein manueller Eingriff erfolgen. Dies kann auch den programmierten Sicherheitsabstand betreffen. Eine erste Abweichung vom definierten Standard kann so eintreten. Im nächsten Schritt - der CNC-Bearbeitungssimulation - wird das durch den Postprozessor generierte NC-Programm simuliert und auf mögliche Kollisionen und Fehler untersucht. Auftretende Kollisionen oder zu gering erscheinende Abstände können in der Regel durch das manuelle Anheben des programmierten Sicherheitsabstandes korrigiert werden. So kommt es auch hier zu einer weiteren Abweichung vom geforderten Standard.

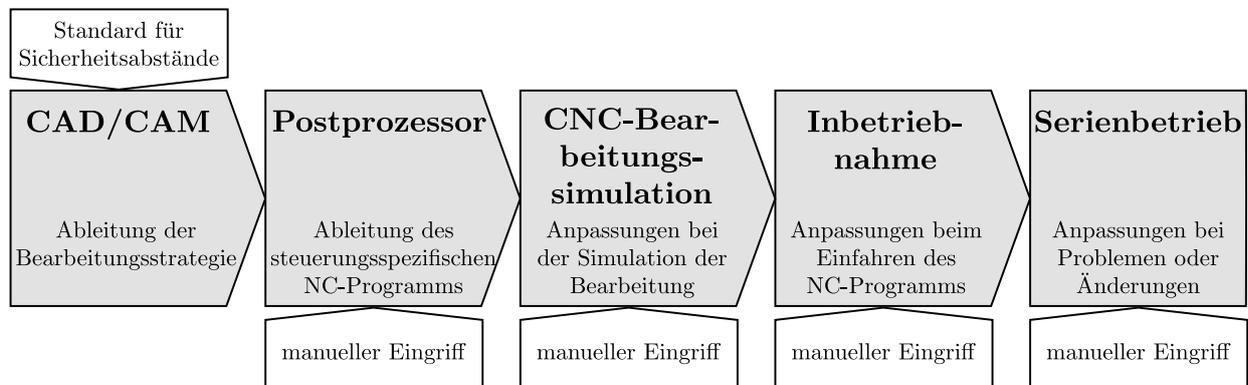


Abbildung 4.3: Einflussfaktoren auf den programmierten Sicherheitsabstand anhand des Entstehungsprozesses eines NC-Programms

Während der Inbetriebnahme des Fertigungsprozesses wird das NC-Programm auf der Werkzeugmaschine eingefahren. Vielfach sind weitere Korrekturen notwendig, da beispielsweise die geforderte Fertigungsqualität nicht erreicht wird, Werkzeuge Probleme bereiten oder die CNC-Bearbeitungssimulation zu ungenau war. Auch hieraus folgen Veränderungen programmierter Sicherheitsabstände. In der darauf folgenden Serienbetriebsphase erfährt das NC-Programm verschiedenste Anpassungen, welche zum Beispiel durch Konstruktionsänderungen oder Qualitätsmängel am Werkstück notwendig werden. Durch die manuellen

Eingriffe werden auch die programmierten Sicherheitsabstände verändert. Letztlich ist zu beobachten, dass die zu Beginn definierten Standards später sehr oft keine Beachtung mehr finden. Der programmierte Sicherheitsabstand ist damit an vielen Stellen deutlich zu hoch angesetzt und verursacht große technische Nebenzeiten.

4.1.3 Bewertung und neuer Programmierstandard

Aus den zuvor erfolgten Betrachtungen kann gefolgert werden, dass der etablierte, programmierte Sicherheitsabstand in der industriellen Fertigung als zufriedenstellend zu bewerten ist. Er spiegelt in etwa die Ergebnisse der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Untersuchungen wider. Trotzdem wird dieser Standard nicht konsequent in den NC-Programmen beachtet. Durch eine Vielzahl an manuellen Anpassungen im Entstehungs- und Änderungsprozess des NC-Programms werden diese Standards verworfen und durch individuelle Werte ersetzt. Da aber gerade durch den programmierten Sicherheitsabstand ein mächtiger Stellhebel zur Reduktion technischer Nebenzeiten vorhanden ist (vgl. Abbildung 4.1), muss der Einhaltung eines Programmierstandards mehr Beachtung geschenkt werden. Um dies erreichen zu können, müsste entweder versucht werden, die manuellen Einflüsse auf das NC-Programm während des Entstehungsprozesses zu minimieren oder die Sichtbarkeit des programmierten Sicherheitsabstands zu erhöhen. Eine Minimierung der manuellen Einflüsse ist aber kaum umsetzbar, da Anpassungen gerade während der Inbetriebnahmephase unabdingbar sind. Dagegen könnte die Erhöhung der Sichtbarkeit des Sicherheitsabstands relativ einfach durch einen neuen Programmierstandard umgesetzt werden. Die bisherige Verrechnung mit dem auf der Werkstückzeichnung befindlichen Nennmaß darf nicht schon durch den Programmierer oder das Programmiersystem extern erfolgen, vielmehr sollte der gewählte Sicherheitsabstand über eine Variable im NC-Programm mitgeführt werden. Im nachfolgend gezeigten Codebeispiel, welches sich an die Zyklenprogrammierung der Siemens AG anlehnt (vgl. Siemens 2008, S. 44ff), wurde die „Rückzugebene (RTP)“ in die zwei Variablen „Nennmaß (RFP)“ und „Sicherheitsabstand (SDIS)“ getrennt. Zwar erfolgt direkt danach wieder die Verrechnung zur Rückzugebene, jedoch ist damit sofort ersichtlich, wie sich diese zusammensetzt. Eine Fehlinterpretation kann damit vermieden werden.

<pre> 1 bisher: 2 3 ;Werkzeugglobale Wertezuweisung an Variablen: 4 RTP=37.5 5 DP1=10 6 7 8 ;Bohren in fertigbearbeitete Oberfläche: 9 G0 G64 Z=RTP 10 G1 G60 Z=DP1 </pre>	<pre> vorgeschlagen: RFP=37 DP1=10 SDIS=0.5 ;(vgl. Tabelle 4.1) RTP=RFP+SDIS G0 G64 Z=RTP G1 G60 Z=DP1 </pre>
--	---

Abbildung 4.4: Vorgeschlagener Standard zur Programmierung des Sicherheitsabstands

4.2 Werkzeugbahn

Neben dem programmierten Sicherheitsabstand stellt die Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen eine der größten Beeinflussungsmöglichkeiten technischer Nebenzeiten dar. Durch Anpassung der Programmierung zwischen zwei Bearbeitungen kann die Bewegung dynamisiert und die benötigte Zeit somit verkürzt werden. Prinzipiell können die Beeinflussungsmöglichkeiten in fünf Bereiche unterschieden werden: Art und Geschwindigkeit der Rückzugbewegung aus einer Bearbeitungsstelle heraus (vgl. Kapitel 2.1), Zeitpunkt des Endes der Werkzeugbahn durch Wahl des entsprechenden Sicherheitsabstandes (vgl. Kapitel 4.1), durch die Nutzung unterschiedlicher NC-Befehle, das Verfahren zur möglichen Bestimmung der Bahnstützpunkte und die parallele Ausführung weiterer NC-Befehle, wie Hilfsfunktionen (vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.4.3). Auf die Parallelisierung von NC-Befehlen wird nachfolgend in einem gesonderten Abschnitt eingegangen.

Beginnend mit der Beschreibung der idealen Werkzeugbahn am Beispiel Bohren werden daran anknüpfend vier unterschiedliche Verfahren vorgestellt, welche sich jeweils in der Methode zur Bestimmung der Stützpunkte und der Wahl der NC-Befehle unterscheiden. Das erste Verfahren beschreibt die etablierte Vorgehensweise mit Hilfe der Steuerungsfunktionen „Genauhalt“, „Bahnsteuerbetrieb“ und „Positionierachsen“ (vgl. Siemens 2013c, S. 110ff). Das zweite Verfahren stellt die Vorausberechnung von Bahnstützpunkten mit Hilfe von Mathematik- beziehungsweise Simulationssoftware dar. Das dritte Verfahren behandelt die Bahnprogrammierung durch Definition von Schutzbereichen als „limitierte, unbestimmte Bahn“ (vgl. Bosch und Heim 2014), während sich das vierte Verfahren der Bestimmung von Bahnstützpunkten mit Hilfe von genetischen Algorithmen direkt an der Werkzeugmaschine widmet. Jedes dieser Verfahren bietet individuelle Vor- wie auch Nachteile, welche in einem abschließenden Abschnitt zusammengefasst und bewertet werden.

4.2.1 Parallele Ausführung von NC-Befehlen

Ein wichtiger Hebel, technische Nebenzeiten zu reduzieren, liegt in der parallelen Ausführung mehrerer NC-Befehle in einem NC-Satz. Sequenziell ausgeführt, würde jeder dieser NC-Befehle eine einzelne Ausführungsdauer hervorrufen. Die parallele Ausführung überlagert diese Segmente und führt so zu einer Verkürzung der Gesamtzeit. Dabei bietet sich insbesondere die Ausführung zusätzlicher NC-Befehle während einer Werkzeugbahn an. Muss beispielsweise vor der eigentlichen Bearbeitung die Kühlmittelzufuhr aktiv sein, so bietet sich eine Aktivierung während der Anfahrbewegung an, da die Ausführung (Ansteuern der Pumpe, Aufbau des Drucks) eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt. Aber auch die Parallelisierung von Achsbewegungen kann sich in einer deutlichen Reduktion technischer

Nebenzeiten niederschlagen. So ist die Spindelpositionierung vor dem Gewindefertigen notwendig, um einen definierten Beginn des Gewindes zu erzielen. Sie kann aber, wie auch die Positionierung von Maschinentischachsen, während des Werkzeugwechsels oder parallel zu Verfahrbewegungen erfolgen. Bis zu welchem Maß eine parallele Ausführung von NC-Befehlen durchführbar ist, hängt letztlich immer vom individuellen Anwendungsfall ab. Kollisionsgefahren und differierende Ausführungszeiten der einzelnen NC-Befehle müssen beachtet werden. Wartemarken, wie sie in Kapitel 4.4.4 erläutert werden, können sich dabei als nützlich erweisen.

4.2.2 Idealbahn am Beispiel Bohren

Die Idealbahn stellt das wünschenswerte Optimum einer Werkzeugbahn dar - ohne dabei Beschränkungen durch die CNC und das NC-Programm Beachtung zu schenken. Vielfach ist diese Idealbahn nicht oder nur sehr aufwendig zu programmieren, da spezielle NC-Befehle nicht zur Verfügung stehen oder notwendige Stützpunkte nicht oder nur sehr aufwendig berechnet werden können. Die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellten Verfahren zur Programmierung der Werkzeugbahn werden dem Ziel, bei geringem Aufwand der idealen Werkzeugbahn zu entsprechen, auf unterschiedliche Weise gerecht. Wie sich eine Idealbahn definiert, ist hier am Beispiel des Bohrens erläutert. Hierbei werden zwei Fälle unterschieden: Der triviale Fall beschreibt zwei Bohrungen in einer Ebene ohne Hindernis (Störgeometrie). Im zweiten Fall erfolgt eine Ergänzung um eine Störgeometrie und/ oder einen Sprung in eine höher oder tiefer liegende Ebene. In Abbildung 4.5 sind beide Fälle dargestellt.

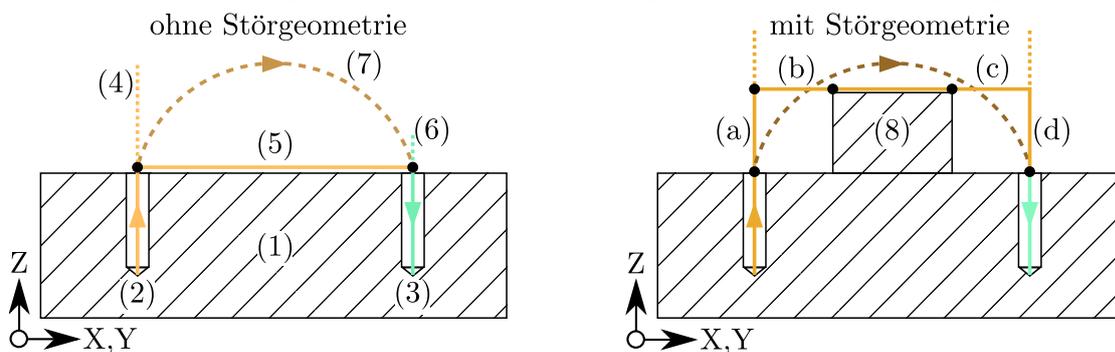


Abbildung 4.5: Darstellung der Segmente einer idealen Werkzeugbahn mit und ohne Störgeometrie am Beispiel Bohren

In einem Werkstück (1) befinden sich jeweils eine Bohrung, in welcher die Werkzeugbahn startet (2), und eine Bohrung, in welcher sie endet (3). Die Bewegung beginnt mit dem schnellstmöglichen Herausfahren aus der Bohrung. Die Z-Achse soll dabei erst verzögern, wenn das Werkzeug die Bohrung verlassen hat. Dafür muss die Achse mindestens entsprechend der Bohrungstiefe herausfahren, da Beschleunigung und Verzögerung im Allgemeinen

symmetrisch sind (4). Bei Verlassen der Bohrung beginnt die Verfahrbewegung mit der X- und Y-Achse in Richtung der Zielbohrung (5). Um mit gewünschter Vorschubgeschwindigkeit die Bohrung zeitoptimal fertigen zu können, sollte die Beschleunigungsphase der Z-Achse während der Verfahrbewegung beginnen. Hierzu ist ein entsprechender Abstand vom Werkstück vorzusehen (6). Die resultierende Werkzeugbahn aller überlagerter Achsbewegungen entspricht dabei einem Bogen (7), welcher bedingt durch Bohrungstiefen, Maschinendynamik und Vorschubgeschwindigkeit unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Aus dieser Beschreibung einer Idealbahn resultiert die Gleichung (vgl. 4.1): Die Zeit für die Idealbahn ohne Störgeometrie ist die Summe der Zeiten der Rückzugbewegung des Werkzeugs, der Bewegung mit der X- und Y-Achse und der Vorschubbewegung zur nächsten Bearbeitung hin.

$$t_{ideal} = t_{Rückzug} + t_{XY} + t_{Vorschub} \quad (4.1)$$

Die Beschreibung einer Werkzeugbahn unter der Berücksichtigung einer Störgeometrie (8) stellt sich komplexer dar. So ist immer eine unbedingte Kollisionsfreiheit zu gewährleisten. Deshalb muss das Herausfahren aus der Bohrung um die Höhe der Störgeometrie ergänzt werden (a). Trotzdem kann bei Verlassen der Bohrung schon die Verfahrbewegung der X- und Y-Achse begonnen werden. Solange die Höhe der Störgeometrie noch nicht erreicht wurde, darf aber nur eine Teilstrecke der Verfahrbewegung absolviert werden (b). Wurde die Störgeometrie erreicht, kann die Störgeometrie vollständig überwunden werden. Sobald dies erfolgt ist, kann mit dem Absenken in Richtung des Ziels begonnen werden (d), während das letzte Teilstück der Verfahrbewegung absolviert wird (c). Da sich die Einzelbewegungen der Achsen vor und nach der Störgeometrie überlagern müssen, ist jeweils die Achse mit der längsten Dauer entscheidend. Die daraus resultierende Werkzeugbahn kann der ohne Störgeometrie entsprechen, sofern die Störgeometrie dieser nicht im Weg liegt. In realen Anwendungsfällen ist dies aber zumeist nicht der Fall, da die Störgeometrien vielfach größere und ungünstigere Dimensionen aufweisen. Aus der zuvor beschriebenen Bewegung resultiert für eine Idealbahn mit Störgeometrie die Gleichung (vgl. 4.2): Die Zeit für die Idealbahn mit Störgeometrie ist die Summe der Zeiten der Rückzugbewegung, der längeren Zeit der Strecken (a) und (b), der Überwindung der Störgeometrie, der längeren Zeit der Strecken (c) und (d) und der Vorschubbewegung zu nächsten Bearbeitung hin.

$$t_{ideal} = t_{Rückzug} + \max(t_a, t_b) + t_{Störgeometrie} + \max(t_c, t_d) + t_{Vorschub} \quad (4.2)$$

Wendet man diese Gleichung auf eine Werkzeugbahn ohne Störgeometrie an, so ist die Dauer von (a) und (d) null. Die Dauer der Teilstrecken (b) und (c) wie auch die Dauer der Überwindung der Störgeometrie ergeben in Summe die Dauer der Verfahrbewegung t_{XY} . Somit resultiert für diesen Fall aus der zweiten Gleichung wieder die erste.

4.2.3 Genauhalt, Bahnsteuerbetrieb und Positionierachsen

Das in der Industrie am weitesten verbreitete Verfahren zur Programmierung von Werkzeugbahnen nutzt die Steuerungsfunktion „Genauhalt“. Sie ist auf den meisten Steuerungen verschiedener Hersteller verfügbar und beschreibt die Möglichkeit, während der Programmausführung achsspezifische Toleranzfenster (bezogen auf die Ist-Position) in ihrer Größe zu variieren (vgl. Kapitel 9.1). Durch die Wahl größerer Toleranzbereiche kann der Zeitpunkt des NC-Satzwechsels vorgezogen werden. Der nachfolgende NC-Satz wird dadurch früher ausgeführt, während die Achsbewegung aus dem vorherigen NC-Satz zu Ende geführt wird. Gleichzeitig führt dies aber auch zu einer Verrundung der Konturen (vgl. Abbildung 4.6). Die in der Steuerungsparametrierungsdatei hinterlegten Parameter zum Genauhalt könnten zwar beliebig angehoben werden, jedoch liegen diese Werte meist bei wenigen Mikrometern, da diese auch für die eigentliche Bearbeitung gebraucht werden. Eine Verrundung der Werkzeugbahn erfolgt somit nur über einen sehr kleinen Bereich, woraus keine ausreichend dynamische Werkzeugbahn resultieren kann.

Eine weitere Funktion von CNCs der Siemens AG zur Programmierung von Werkzeugbahnen stellt der Bahnsteuerbetrieb dar. Dabei „wird die Bahngeschwindigkeit am Satzende zum Satzwechsel nicht auf eine Geschwindigkeit abgebremst, die ein Erreichen des Genauhaltkriteriums ermöglicht“ (Siemens 2013c, S. 308). Vielmehr versucht die CNC „mit möglichst gleicher Bahngeschwindigkeit in den nächsten Satz zu wechseln“ (Siemens 2013c, S. 308). Auch andere Steuerungshersteller bieten Funktionen wie zum Beispiel „Smart overlap“ an, welche dem Bahnsteuerbetrieb ähnlich sind (vgl. Fanuc 2015, S. 4). Daraus resultiert eine Verrundung der Werkzeugbahn, welche insbesondere bei Satzübergängen zwischen den gleichen Achsen zu einer Verkürzung technischer Nebenzeiten führt. Jedoch ist auch hier - abhängig von den programmierten Bahnsegmenten - die Verrundung auf wenige Millimeter beschränkt und damit wie der Genauhalt nicht zufriedenstellend. Das Resultat einer Programmierung der Werkzeugbahn mit Genauhalt oder Bahnsteuerbetrieb ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

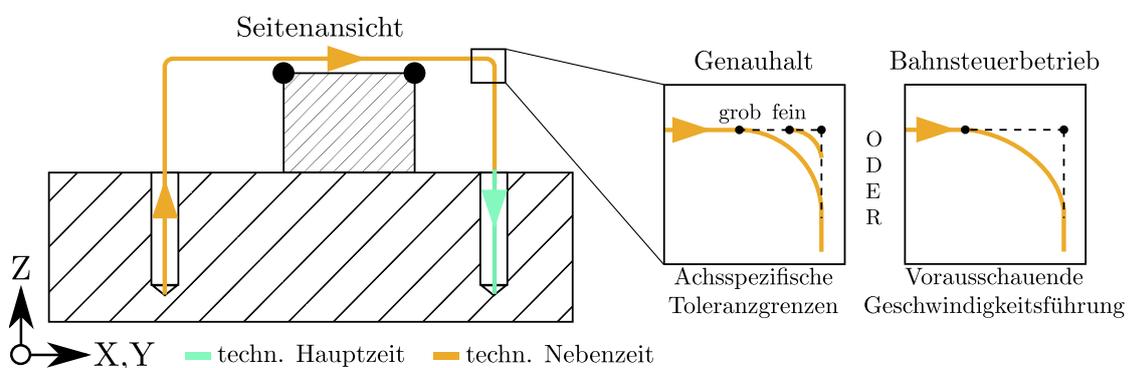


Abbildung 4.6: Werkzeugbahn mit Genauhalt oder Bahnsteuerbetrieb (vgl. SiemensAG 2013c, S. 305ff)

Die dritte Möglichkeit, die benötigte Zeit für die Werkzeugbahn mit einfachen NC-Befehlen zu verkürzen, stellt der „Positionierachsenbetrieb“ dar. Während bei einer programmierten Eilgangbewegung mit „G0“ die beteiligten Achsen normalerweise in einer Gerade miteinander interpolieren, verfahren die Achsen als Positionierachse eigenständig mit ihrer maximal möglichen Dynamik (vgl. Siemens 2013c, S. 189). Dies erweist sich insbesondere als deutlicher Vorteil, wenn sich die Dynamik der Achsen wesentlich unterscheidet (vgl. Kapitel 4.10). Jedoch ist die daraus resultierende Zeitersparnis zu gering, um als zufriedenstellend betrachtet werden zu können. Weiterhin steigt auch die Kollisionsgefahr des Werkzeugs mit seiner Umgebung, da die Werkzeugbahn nun nicht mehr einer Geraden folgt sondern gekrümmt ist.

Die drei vorgestellten Verfahren konnten nicht den gewünschten Effekt erzielen, die benötigte Zeit für eine Werkzeugbahn deutlich zu verkürzen. Deshalb wurden weitere Verfahren betrachtet beziehungsweise entwickelt, welche nachfolgend vorgestellt werden.

4.2.4 Vorausberechnete Bahn

Unter dem Begriff der „vorausberechneten Bahn“ werden in dieser Arbeit alle Verfahren zusammengefasst, welche unter Berücksichtigung der spezifischen Maschinendynamik die Stützpunkte der zeitoptimalen Werkzeugbahn beziehungsweise die Werkzeugbahn selbst im Voraus an Computern berechnen können. Mit Hilfe unterschiedlich vieler Dynamikparameter wird je nach Verfahren versucht, die Maschine in ihren dynamischen Eigenschaften ausreichend genau abzubilden und so die schnellste Werkzeugbahn von einem definierten Startpunkt zu einem definierten Zielpunkt zu bestimmen. Die Güte der so bestimmten Werkzeugbahn hängt dabei maßgeblich von der in der Berechnung miteinbezogenen Anzahl an Dynamikparametern ab. Während viele CAM-Systeme für ihre Simulation nur wenige Dynamikparameter berücksichtigen, ist es für das Bestimmen der zeitoptimalen Werkzeugbahn zwingend notwendig, möglichst viele Dynamikparameter in die Berechnung miteinzubeziehen. Die daraus resultierenden Berechnungen können damit aber hoch komplex werden.

Nach der Bestimmung der schnellsten Werkzeugbahn muss diese auf die Werkzeugmaschine übertragen werden. Sie kann zum Beispiel mit Stützpunkten beschrieben werden, welche mit Polynom- oder Splinesegmenten verknüpft sind. Hier zeigt sich, ob die zur Berechnung herangezogenen Dynamikparameter ausreichend waren und damit die Dauer der Werkzeugbahn wesentlich verkürzt werden kann. Jedoch birgt das Verfahren auch bedeutende Nachteile: So ist eine Anpassung der Werkzeugbahn direkt an der Werkzeugmaschine oftmals nicht mehr sinnvoll durchführbar, da die Werkzeugbahn durch eine Abfolge komplexer NC-Befehle erzeugt wird. Eine notwendig werdende Veränderung - zum Beispiel,

weil eine Bearbeitungsstelle verschoben wurde - muss wieder an die Computerprogramme zurück gegeben werden, welche auch die ursprüngliche Werkzeugbahn berechnet hatten. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt konnten aber keine Computerprogramme identifiziert werden, welche automatisiert zufriedenstellende Werkzeugbahnen liefern, die zugleich manuell anpassbar bleiben.

4.2.5 Limitierte, unbestimmte Bahn

In der Patentoffenlegungsschrift „Verfahren zur Steuerung einer Bearbeitungsmaschine“ (Bosch und Heim 2014) wird gezeigt, wie es durch die Definition von Schutzbereichen möglich ist, die CNC eine schnellere Werkzeugbahn erzeugen zu lassen. Die Programmierung der Werkzeugmaschine erfolgt so, dass ein Bereich zur freien Bewegung des Werkzeugs vorgegeben wird. Der in Kapitel 2.1 getroffenen Definition technischer Nebenzeiten folgend, beginnt die Werkzeugbahn nach Abschluss der vorhergehenden Bearbeitung im Werkstück (1). Dies ist in Abbildung 4.7 als (2) dargestellt.

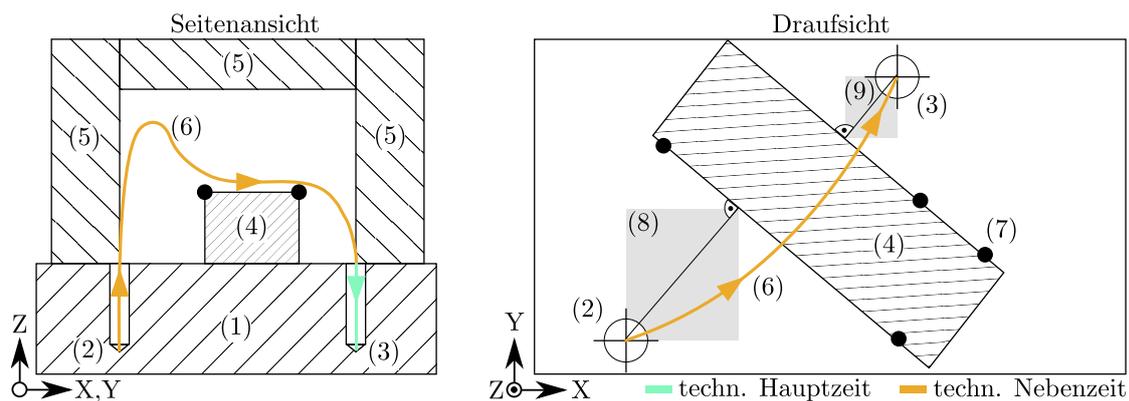


Abbildung 4.7: Darstellung der Schutzbereiche und der daraus resultierenden Werkzeugbahn (vgl. Bosch und Heim 2014)

Beim Verlassen der Bearbeitungsstelle ist die CNC nicht mehr auf eine Bewegung der Z-Achse beschränkt und die Positionierung in X und Y beginnt. Jedoch bildet eine mögliche Störgeometrie (4) einen Bereich, welcher vom Werkzeug keinesfalls verletzt werden darf. Dies gilt auch für den erweiterten Arbeitsraum (5), welcher auf Grund weiterer Störgeometrien geschützt werden muss. Durch ein Einsetzen der Verzögerung der Z-Achse erst auf Höhe der Störgeometrie entsteht die in (6) dargestellte, charakteristische Bewegungsform. Bei erneuter Bauteilberührung endet die technische Nebenzeit und die folgende Bearbeitung beginnt (3). Bei einer Bewegung, welche die Passage einer Störgeometrie erfordert, werden mit Hilfe von jeweils zwei Punkten auf den beiden Kanten der Störgeometrie (7) zwei Lotgeraden erzeugt. Sie dienen dazu, Rechtecke aufzuspannen, in welchen sich das

Werkzeug kollisionsfrei bewegen kann. Hat das Werkzeug die Höhe der Störgeometrie überschritten, kann es das erste Rechteck (8) verlassen und die Störgeometrie überwinden. Nur im zweiten Rechteck (9) darf es wieder die Störgeometriehöhe unterschreiten und sich der nachfolgenden Bearbeitungsstelle nähern.

Das mit diesem Verfahren erzielbare Einsparungspotenzial steht zwar der Idealbahn deutlich nach, trotzdem kann so oftmals eine Einsparung in der Gesamttaktzeit gegenüber einer Programmierung mit Genauhalt von mehr als fünf Prozent erzielt werden (vgl. Tabelle 4.2). Als nachteilig hat sich erwiesen, dass diese Form der Bewegung bisher nur auf einer Siemens Sinumerik 840D sl programmiert werden konnte, da Steuerungen anderer Hersteller die hierfür notwendigen „Synchronaktionen“ (vgl. Siemens 2013e) nicht besitzen. Andererseits kann dieses Verfahren auf Werkzeugmaschinen angewandt werden, sofern sie mit einer Siemens CNC betrieben werden. Ein einmalig an die Werkzeugmaschine angepasster Zyklus, welcher das Verfahren abbildet, kann im Bearbeitungsprogramm beliebig oft wiederverwendet werden, wobei jeweils nur die Koordinaten des Ziels und der Störgeometrie dem Zyklus übergeben werden müssen (vgl. Kapitel 6.1.2). Dieses Verfahren hat sich schon in der Großserienproduktion bewährt, da es für den Anwender anpassungsfreundlich ist und trotzdem eine deutliche Optimierung erzielt werden kann.

4.2.6 Genetische Algorithmen

Die zwei zuvor vorgestellten Verfahren verfolgen zwei differierende Wege. Während bei der Vorausberechnung der Werkzeugbahn jeglicher Aufwand zur Bahnbestimmung auf Computerprogramme ausgelagert wird, besitzt die CNC durch das Verfahren der „limitierten, unbestimmten Bahn“ die Möglichkeit, Bewegungen frei auszuführen, solange keine Schutzbereiche verletzt werden. Das nun nachfolgend vorgestellte Verfahren greift diese beiden Ansätze auf. Mit Hilfe genetischer Algorithmen soll es möglich werden, dass die CNC selbst in einem vorhergehenden Inbetriebnahmeprozess die schnellste Werkzeugbahn ermittelt. So könnte auf maschinenexterne Computerprogramme gänzlich verzichtet werden, welche die Werkzeugbahn vorausberechnen. Weiterhin soll so erreicht werden, dass das mit diesem Verfahren erzielbare Optimierungsergebnis der Idealbahn näher kommt als die limitierte, unbestimmte Bahn.

In einer weiteren Patentoffenlegungsschrift mit dem Titel „Verfahren zur Steuerung einer Bearbeitungsmaschine“ (Bosch 2015) wird ein solcher genetischer Algorithmus behandelt. Als Ansatz wurde hierbei eine simple Form des „Bergsteiger-Algorithmus“ (vgl. Heistermann 1994) ausgewählt. Die iterative Verbesserung der Werkzeugbahn wird dabei selbstständig durch die CNC-Werkzeugmaschine durchgeführt. Dabei wird mittels zweier Stützpunkte eine Spline-Kurve aufgespannt, welche einen tangentialen Übergang zur vorgehen-

den und nachfolgenden Bewegung besitzt. Hierbei hat sich mittels Versuchen ein kubischer Spline als am geeignetsten erwiesen. Er setzt sich aus mehreren Polynomsegmenten dritten Grades zusammen und wird bei praktischen Berechnungen häufig verwendet (vgl. Törnig 1979, S. 101f). Die Stützpunkte werden durch den Algorithmus immer wieder variiert, die so erzielte Werkzeugbahn abgefahren und die benötigte Zeit gemessen. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Komplexität und die zu absolvierenden Optimierungsschritte sich stark ausweiten, wenn der Algorithmus eine dreidimensionale Werkzeugbahn optimieren muss, welche kollisionsfrei eine Störgeometrie umfahren soll.

Zu Beginn des Verfahrens wird ein Koordinatenmuster für die beiden Stützpunkte erzeugt. Begrenzt wird das Muster durch Start, Ziel und etwaige Störgeometrien (vgl. (1) in Abbildung 4.9). Anschließend erfolgt die Selektion des besten Stützpunktpaares, welches den Spline mit der kürzesten Bewegungsdauer erzeugt hat. In einem weiteren Schritt folgt die Variation der Stützpunkte. Anhand einer festgelegten „Schrittweite“ werden die einzelnen Koordinaten verschoben. Wird dadurch die Bewegungsdauer verkürzt, erfolgt ein weiterer Schritt in die selbe Richtung. Konnte schon mit dem ersten Schritt nur eine Verschlechterung erzielt werden, so wird die Schrittrichtung gedreht. Sofern auch hier keine Verbesserung der Bewegungsdauer erzielt werden kann, wird die Koordinate getauscht und ein neuer Schritt ausgeführt. Dies geschieht so lange, bis alle Richtungen beider Stützpunkte abgesprochen wurden. Konnte damit eine zeitliche Verbesserung erzielt werden, beginnt der Vorgang von neuem. Wurde jedoch keine Verbesserung erreicht, so folgt eine Verringerung der Schrittweite. Hierbei bietet sich eine Halbierung der Schrittweite an. Das „Abschreiten“ der Koordinaten beginnt nun von neuem. Erreicht die Schrittweite irgendwann ihr Abbruchkriterium, so endet der Algorithmus nach letztmaligem „Abschreiten“ der Richtungen mit minimaler Schrittweite. Die so ermittelten Stützpunkte beschreiben nun einen Spline mit möglichst kurzer Bewegungsdauer (vgl. Abbildung 4.9). Der in diesem Abschnitt beschriebene genetische Algorithmus wurde in einem NC-Programm für eine Siemens Sinumerik Steuerung umgesetzt und findet sich im Anhang 9.4. Das Ergebnis solch einer Optimierung wird, wie in folgendem Beispiel für eine Siemens Sinumerik 840D, als einfacher NC-Code programmiert:

```

1  G0 G64      X=0    Y=0    Z=0.5      ; Start
2  CSPLINE    X=50    Y=40   Z=20.5  F=99999
3             X=80.5  Y=60   Z=17.5
4             X=100   Y=100  Z=0.5      ; Ziel
5  G1 G60 G601      Z=-30  F=2000 ; techn. Hauptzeit
```

Abbildung 4.8: Beispiel zur Programmierung eines Splines an einer Siemens Sinumerik

Prinzipiell wären auch Verfahren denkbar, welche auf komplexere genetische Algorithmen zurückgreifen. So könnte auch ein evolutionärer Mechanismus hinzugefügt werden, der die Startpopulationen miteinander „kommunizieren“ lässt (vgl. Heistermann 1994, S. 84).

Doch auch bei solch einem Algorithmus sind Nachteile aufzuführen: Bei einer Optimierung durch einen einfachen genetischen Algorithmus, wie ihn der Bergsteiger-Algorithmus darstellt, kann es immer vorkommen, dass anstelle des globalen Optimums nur ein lokales gefunden wird. Die daraus resultierenden Werkzeugbahnen sind aber zumeist nur um wenige Millisekunden langsamer als die des globalen Optimums. Größter Nachteil dieses Verfahrens ist aber der stark vergrößerte Inbetriebnahmeaufwand. Eine einzelne Optimierung kann in einem dreidimensionalen Fall durchaus mehrere Minuten in Anspruch nehmen und dieser Algorithmus müsste für jede Werkzeugbahn von neuem durchlaufen werden. In einer oftmals angespannten Inbetriebnahmephase sind Mehraufwände aber nicht hinnehmbar. Diesem Dilemma könnte man aber entgegen, indem die Optimierung vorab in einer CNC-Bearbeitungssimulation durchgeführt wird (vgl. Kapitel 3.3). Mögliche Abweichungen zum realen Fertigungssystem könnten dann durch eine zweite, feine Optimierung an der Werkzeugmaschine kompensiert werden. Die mit diesem Verfahren erzielten Werkzeugbahnen erreichen in den meisten Fällen deutliche Verbesserungen gegenüber dem zuvor vorgestellten Verfahren der limitierten, unbestimmten Bahn (vgl. Kapitel 4.2.7).

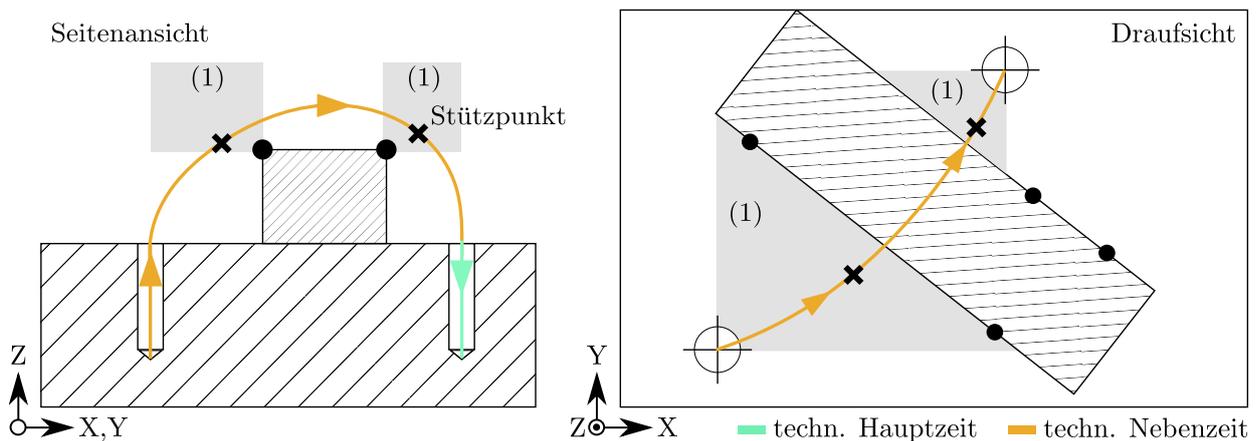


Abbildung 4.9: Darstellung einer durch einen Spline erzeugten Werkzeugbahn

4.2.7 Vergleich und Bewertung

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Verfahren zur Bestimmung und Programmierung einer schnelleren Werkzeugbahn besitzen jeweils Vor- und Nachteile. Bei der Anwendung dieser Verfahren und auch im Gespräch mit Personen, welche bei der Programmierung, Inbetriebnahme oder Produktion beteiligt sind, konnten fünf verschiedene Anforderungen an eine optimierte Werkzeugbahn identifiziert werden: Die erste und wichtigste Anforderung stellt den Wunsch dar, mit dem jeweiligen Verfahren die physikalisch schnellstmögliche Werkzeugbahn (Idealbahn) zu erhalten. Weiterhin sollte sich bei der Berechnung und Programmierung, der Inbetriebnahme und während der Produktionsphase der Aufwand für Anwendung und Anpassung dieser Verfahren möglichst gering halten. Bedeutsam ist hier-

bei vor allem der Inbetriebnahmeaufwand, gefolgt von der Anpassungsfreundlichkeit im Betrieb. Letzte identifizierte und nicht minder wichtige Anforderung stellt die Verfügbarkeit des Verfahrens auf Steuerungen verschiedener Hersteller dar. Nur wenn die jeweiligen Funktionen, wie beispielsweise Splines, auf der jeweiligen CNC zur Verfügung stehen, kann das Verfahren auch angewandt werden.

Zieht man Tabelle 4.2 für eine Bewertung des ersten Kriteriums heran, so zeigt sich, dass der Genetische Algorithmus das beste Ergebnis erzielt. Das Verfahren der limitierten, unbestimmten Bahn in seinem Optimierungsergebnis steht dem Genetischen Algorithmus deutlich nach, weist aber einen klaren Vorteil gegenüber einer konventionellen Programmierung mit Genauhalt und Bahnsteuerbetrieb auf.

Tabelle 4.2: Vergleichsmessungen der mit unterschiedlichen Verfahren erzeugten Werkzeugbahnen in einer CNC-Bearbeitungssimulation mit SIL (Werte ohne Einheit in mm, vgl. Maschinendynamik in Tabelle 9.2)

Bewegung von	Störgeometrie	Bewegung nach	Idealbahn	Genauhalt/ Bahnsteuerbetrieb	Limitierte, unbestimmte Bahn	Genetische Algorithmen
X=0 Y=0	-	X=10 Y=0	0,552 s	0,692 s	0,676 s	0,600 s
	-	X=50 Y=0	0,616 s	0,756 s	0,704 s	0,640 s
	-	X=100 Y=20	0,636 s	0,800 s	0,748 s	0,700 s
	-	X=250 Y=0	0,748 s	0,888 s	0,808 s	0,776 s
Bohrungen: Tiefe=30	-	X=100 Y=200	0,724 s	0,860 s	0,804 s	0,772 s
Vorschub= 5000 mm/min	B=20 H=20	X=100 Y=10	0,636 s	0,872 s	0,856 s	0,688 s
	B=50 H=20	X=70 Y=0	0,632 s	0,856 s	0,844 s	0,660 s
	B=100 H=30	X=150 Y=30	0,692 s	0,932 s	0,872 s	0,720 s
	B=20 H=100	X=0 Y=100	0,636 s	1,032 s	1,020 s	0,780 s
	B=50 H=140	X=10 Y=70	0,684 s	1,064 s	0,992 s	0,872 s

Der Aufwand zur Bestimmung und Programmierung der verschiedenen Werkzeugbahnen, zusammengefasst unter dem Begriff „Engineeringaufwand“, unterscheidet sich sehr deutlich voneinander. So sind die konventionelle Programmierung und Splines (in Verbindung mit dem Genetischen Algorithmus) sehr leicht in einem NC-Programm umzusetzen, während limitierte, unbestimmte Bahnen und insbesondere die Vorausberechnung der Werkzeugbahn einen deutlichen Mehraufwand bedeuten würden.

Während sich bei einer konventionell programmierten Werkzeugbahn die Inbetriebnahme zumeist auf ein einmaliges Einfahren beschränkt, kann die Inbetriebnahme vorausberechneter Bahnen und limitierter, unbestimmter Bahnen deutlich komplexer ausfallen, da eine

Vielzahl an Beeinflussungsmöglichkeiten gegeben ist und die Werkzeugmaschine gegebenenfalls für den Anwender in „ungewohnter Form“ reagiert. Die Abarbeitung eines genetischen Algorithmus erfordert einen sehr großen Inbetriebnahmeaufwand.

Die Anpassung der Werkzeugbahn ist auf Grund sich ändernder Fertigungsprozesse oftmals notwendig. Während eine konventionelle Werkzeugbahn sehr einfach geändert werden kann, gestaltet sich dies bei den anderen Verfahren teilweise deutlich schwieriger. Eine limitierte, unbestimmte Werkzeugbahn ist zwar sehr einfach anpassbar, jedoch nur für einen geübten Anwender, welcher die Vielzahl möglicher Beeinflussungen zu unterscheiden weiß. Eine Werkzeugbahn, welche mittels eines genetischen Algorithmus ermittelt wurde, muss nach einer Anpassung wieder neu bestimmt werden, wodurch es zu einem deutlichen Mehraufwand kommt. Die Anpassung einer vorausberechneten Werkzeugbahn ist im Fertigungssystem kaum möglich. Sie muss mit Hilfe von Computerprogrammen neu berechnet und dann auf die CNC neu aufgespielt werden.

Resultierend aus der Bewertung der Verfahren zur Bestimmung einer Werkzeugbahn anhand der zuvor genannten fünf Kriterien kann an dieser Stelle keinem Verfahren der Vorzug gegeben werden. Vielmehr besitzt jedes Verfahren seine individuellen Vorteile, die es je nach Anwendungsfall am geeignetsten erscheinen lassen. Die qualitative Bewertung findet sich in Tabelle 4.3. Das Verfahren der vorausberechneten Bahn kann nur vorläufig bewertet werden, da ein geeignetes Computerprogramm nicht identifiziert werden konnte.

Tabelle 4.3: Bewertung der verschiedenen Verfahren zur Bestimmung einer Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen

Kriterium	Genauhalt & Bahnsteuerbetrieb	Vorausberechnete Bahn	Limitierte, unbestimmte Bahn	Genetische Algorithmen
Geringe Abweichung zur Idealbahn	○	(++)	+	++
Geringer Inbetriebnahmeaufwand	++	(+)	+	○
Anpassbarkeit im Fertigungssystem	++	(○)	+	○
Geringer Engineeringaufwand	++	(○)	+	++
Verfügbarkeit auf versch. Steuerungen	++	(+)	○	+

4.3 Bearbeitungsreihenfolge

Neben der Werkzeugbahn, welche im vorherigen Kapitel beschrieben wurde, hat auch die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs (kurz Bearbeitungsreihenfolge) maßgeblichen Einfluss auf die technischen Nebenzeiten und damit auch auf den Fertigungsprozess. Die Bestimmung der „optimalen Reihenfolge“ ist Gegenstand vieler Werbeprospekte von CAD-CAM-Systemen (vgl. Mastercam 2015; SolidCAM 2014, S. 37f). Hierbei kann zusammenfassend gesagt werden, dass eine Vielzahl an möglichen Verfahren zur Bestimmung der „optimalen Reihenfolge“ vorhanden, aber ein Großteil davon nicht zufriedenstellend ist. Einer der Gründe ist die Nichtberücksichtigung wichtiger Maschinenparameter in der Berechnung, wie zum Beispiel des Rucks (vgl. Grötschel 2015, S. 101ff). Dies gilt auch für das in Kapitel 2.3.1 vorgestellte Verfahren der Leibniz Universität Hannover. Vielfach entsteht die programmierte Reihenfolge im NC-Bearbeitungsprogramm nicht durch ein Optimierungsverfahren, sondern anhand der fortlaufenden Identifikationsnummer einzelner Bearbeitungsstellen oder durch „Augenmaß“ des Programmierers. Die so erzielten Ergebnisse erscheinen damit nur auf den ersten Blick zufriedenstellend, bergen jedoch noch ein großes Optimierungspotenzial.

Die vielfach beworbenen Optimierungsverfahren haben als Zielbild zumeist den kürzesten Weg oder eine „schöne Reihenfolge“, wie eine Schlangenlinie. Bei all diesen Verfahren wird aber außer Acht gelassen, dass die Werkzeugmaschine mit ihrer spezifischen Achsdynamik das Optimum mitbestimmt. Würden sich die Dynamikparameter einzelner Achsen nicht voneinander unterscheiden, könnte die Annahme getroffen werden, dass die kürzeste Bearbeitungsreihenfolge auch die schnellste ist. Jedoch ist dies in den meisten Fällen nicht zutreffend. Fast alle Werkzeugmaschinen unterschiedlicher Hersteller weisen keine gleichen Dynamikparameter für die X- und Y-Achse auf. Außerdem wird bei einer Bearbeitungsreihenfolge zumeist die Werkzeugwechselposition als fester Start- und Endpunkt vernachlässigt, eine Position im Arbeitsraum, welche die Werkzeugmaschine mit ihrer Spindel immer anfahren muss, um den Werkzeugwechsel beginnen oder beenden zu können.

Um die schnellste Bearbeitungsreihenfolge unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Aspekte bestimmen zu können, bietet sich die Aufstellung und Lösung eines Travelling Salesman-Problems an (vgl. Bosch 2014). Allerdings ist das Optimierungsziel, wie vielfach in der Literatur beschrieben (vgl. Matai 2010, S. 1), nicht der kürzeste Gesamtweg oder minimale Reisekosten, sondern die kürzeste Gesamtzeit. Da dieses Problem oftmals nicht trivial lösbar ist, bietet sich für kleine oder symmetrische Punktmengen ein vereinfachter Zwischenschritt an: die Reihenfolge anhand der „Vorzugsrichtung“ zu bestimmen. Diese beiden Lösungsverfahren sind nachfolgend detailliert beschrieben.

4.3.1 Vorzugsrichtung

Die Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge über die Vorzugsrichtung lässt sich immer dann sinnvoll einsetzen, wenn es wenige Bearbeitungsstellen gibt oder diese symmetrisch auf dem Werkstück verteilt sind. Ein Blick auf die Achsparameter der jeweiligen Achsen kann die zu wählende Vorzugsrichtung vielmals ersichtlich machen. Liegen alle Bearbeitungsstellen in einer Ebene und folgt man der Norm für Koordinatenachsen (vgl. DIN 1975), dass die Bearbeitungsrichtung beim Bohren und ähnlichen Fertigungsverfahren immer mit der Z-Achse erfolgt, erscheinen viele Bearbeitungsreihenfolgen als rein zweidimensionales Problem. Die für eine Optimierung der Reihenfolge relevanten Achsen sind damit nur die X- und Y-Achse.

Aus vorhergegangenen Versuchen (vgl. Kapitel 9.3) und der in einigen CAM-Systemen zu definierenden Maschinendynamik (vgl. Siemens 2015c) können die zu betrachtenden Dynamikeinstellungen der relevanten Achsen auf wenige Parameter begrenzt werden. Um eine hinreichende Genauigkeit (Abweichung nicht größer 10%) bei der Berechnung der Bewegungszeit zu erreichen, sind drei Parameter entscheidend: die maximale Achsgeschwindigkeit, die maximale Achsbeschleunigung und der maximale axiale Ruck. Um das Ergebnis zu spezifizieren, könnten aber auch weitere Dynamikparameter wie der k_v -Faktor in die Berechnung mit heran gezogen werden (beispielsweise als statischer Korrekturwert).

Vielfach ist die Bestimmung der Vorzugsrichtung trivial. Dies ist dann der Fall, wenn eine Achse in allen Parametern dynamischer oder zumindest gleich dynamisch ist. In nachfolgender Tabelle 4.4 ist als Beispiel ein Bearbeitungszentrum zur Fertigung von Kurbelgehäusen herangezogen:

Tabelle 4.4: Achsdynamik eines Bearbeitungszentrums für die Kurbelgehäusefertigung

	X-Achse	Y-Achse
max. Geschwindigkeit	1 $\frac{m}{s}$	1,25 $\frac{m}{s}$
max. Beschleunigung	7 $\frac{m}{s^2}$	8 $\frac{m}{s^2}$
max. Ruck	25 $\frac{m}{s^3}$	200 $\frac{m}{s^3}$

Es ist ersichtlich, dass sich die Werkzeugmaschine mit ihrer Y-Achse deutlich dynamischer als mit der X-Achse verhält. Die Reihenfolge von Bearbeitungsstellen sollte deshalb so gewählt werden, dass bei ähnlich langen Gesamtstrecken die Y-Achse mehr Weg absolviert. Die Werkzeugwechselposition sollte bei der Wahl der ersten und letzten Bearbeitungsstelle beachtet werden. Ein triviales Beispiel wird in Abbildung 4.10 aufgezeigt. Dabei ist zu beachten, dass viele Bearbeitungsstellen eines Werkzeugs in der automobilen Großserienfertigung ähnlich trivial verteilt sind und somit mit Hilfe der Vorzugsrichtung häufig die schnellste Reihenfolge gefunden werden kann. Im Beispiel befindet sich die Werkzeugwechselposition (1) mittig zwischen den zehn Bearbeitungsstellen (2). Vergleicht man die

ursprüngliche, suboptimale Reihenfolge mit der optimalen, so ist das Potenzial ersichtlich. Der Gesamtweg bleibt unverändert, jedoch verkleinert sich die zu absolvierende Strecke für die X-Achse von zehn auf sechs Teilstrecken. Dagegen vergrößert sich die Strecke der Y-Achse von drei auf sieben Teilstrecken.

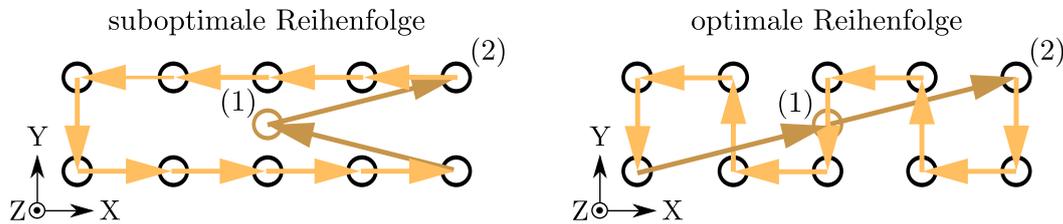


Abbildung 4.10: Exemplarische Darstellung der Vorzugsrichtung Y (vgl. Tabelle 4.4)

Die Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge ist aber nicht trivial, wenn auf Grund der Dynamikparameter nicht mehr eindeutig zu unterscheiden ist, welche Achse dynamischer ist (vgl. Tabelle 9.3). Auch kann die Menge an Bearbeitungsstellen eines Werkzeugs leicht zweistellig und unsymmetrisch über das Bauteil verteilt sein. Tritt dieser Fall ein, so sollte die Aufstellung und Lösung eines Travelling Salesman-Problems herangezogen werden.

4.3.2 Lösung eines Travelling Salesman-Problems

Das in der Literatur vielfach beschriebene Travelling Salesman-Problem (TSP) stellt ein klassisches kombinatorisches Optimierungsproblem dar (vgl. Williams 2005). Es besteht darin, die Reihenfolge für eine beliebige Anzahl an Punkten zu finden, für welche sich die kürzeste Gesamtstrecke ergibt. Wie schon zu Beginn dieses Teilkapitels beschrieben, gibt es CAD-CAM-Systeme, welche für Bearbeitungsreihenfolgen die kürzeste Gesamtstrecke suchen, die Maschinendynamik aber außer Acht lassen. Auch wurden in den letzten Jahren einige Abhandlungen veröffentlicht, welche versuchen, die kürzeste Reihenfolge mit verschiedensten Ansätzen zu finden (vgl. Kumar u.a. 2014; Chen und Zhong 2010; Montiel-Ross u.a. 2012).

Das Ziel eines neuen Verfahrens muss es deshalb sein, die schnellste Bearbeitungsreihenfolge unter Beachtung der Maschinendynamik zu finden. Grundsätzlich ist ein TSP auch in einer Werkzeugmaschine im Allgemeinen symmetrisch: eine Achsbewegung dauert in eine Richtung genau so lange wie umgekehrt. Denn die Parametrierung der Maschinenachsen kann sich in positiver und negativer Richtung nicht unterscheiden (vgl. Siemens 2010b, S. 474).

Wie in der Patentoffenlegungsschrift „Verfahren zum Bestimmen einer Bearbeitungsreihenfolge für ein spanend zu bearbeitendes Werkstück“ (Bosch 2014, S. 3) beschrieben wurde,

ist es in einem ersten Schritt notwendig, für jeden möglichen Weg die Bewegungsdauer zu bestimmen. Ist für die Erreichung des Zwischenziels nur die Bewegung einer Achse notwendig, so lässt sich dies mit Hilfe der Formeln für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck in Form einer „ungleichmäßig beschleunigten Bewegung“ tun (vgl. Formeln 4.3 und 4.4, Kapitel 9.3 und Abbildung 4.11).

$$t_{\text{Verfahr}} = 2 \cdot t_3 + \Delta t_{v_{\text{max}}} = \frac{2 \cdot v_{\text{max}} - 2 \cdot j_{\text{max}} \cdot t_1^2}{a_{\text{max}}} + \frac{2 \cdot a_{\text{max}}}{j_{\text{max}}} + \Delta t_{v_{\text{max}}} \quad (4.3)$$

$$s_{\text{Verfahr}} = -\frac{1}{3} \cdot j_{\text{max}} \cdot t^3 + a_{\text{max}} \cdot t^2 + 2 \cdot v_{\text{max}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{a_{\text{max}}^2}{j_{\text{max}}} \cdot t + 2 \cdot a_{\text{max}} \quad (4.4)$$

$$+ j_{\text{max}} \cdot t_1^2 \cdot t_2 + \frac{1}{3} \cdot j_{\text{max}} \cdot t_1^3$$

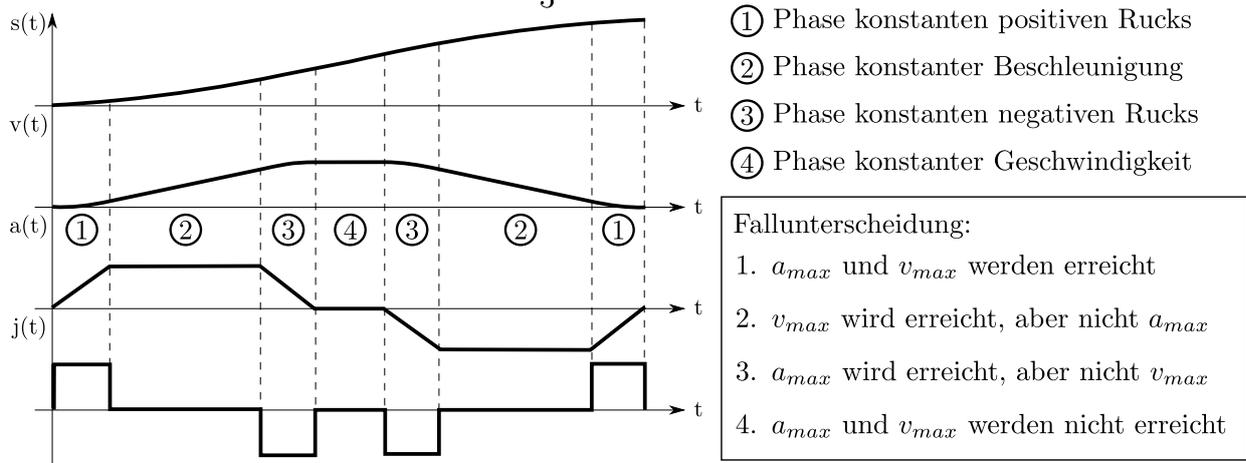


Abbildung 4.11: Ungleichmäßig beschleunigte Bewegung mit Erreichen der Maximalbeschleunigung und Maximalgeschwindigkeit

Da sowohl Beschleunigung als auch Verzögerung im Allgemeinen über einen Wert parametrisiert werden, ergibt sich ein symmetrisches Geschwindigkeitsprofil (vgl. Siemens 2010b, S. 485). Bei kurzen Bewegungen kann die maximale Geschwindigkeit, Beschleunigung oder gar der maximale Ruck nicht erreicht werden, hierfür ist eine Fallunterscheidung zu treffen und die Berechnung anzupassen (vgl. Abbildung 4.11). Ist das Zwischenziel aber nur durch die Bewegung mehrerer Achsen zu erreichen (zum Beispiel der X- und Y-Achse), so ist zu prüfen, ob die beiden Achsen interpolierend verfahren oder ob es sich um eine Überlagerung zweier Einzelbewegungen handelt. Bei einer programmierten Geradeninterpolation könnten beide Achsen ihre Dynamik nur so weit ausspielen, wie es unter Aufrechterhaltung der Geradeninterpolation möglich wäre (vgl. Siemens 2013c, S. 189). Wie zuvor in Kapitel 4.2 beschrieben, ist es aber gerade für eine Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen sinnvoll, auf eine Interpolation zu verzichten. Zur Bestimmung der Bewegungsdauer von einem Punkt zum nächsten sollte deshalb eine Bewegung mit mehreren Achsen als Überlagerung von Einzelachsen angesehen und programmiert werden. Die Bewegungsdauer für eine Teilstrecke ergibt sich damit aus der längsten, einzelnen Bewegungsdauer aller an der Bewegung beteiligter Achsen.

Grundsätzlich wird ein TSP mit einer wachsenden Anzahl an Punkten schnell sehr komplex, weshalb die manuelle Lösung des Problems schon bei wenigen Bearbeitungsstellen zu aufwendig wird. Es ist deshalb ratsam, auf IT-Systeme zurückzugreifen. Durch die fakultativ wachsende Komplexität ist ein TSP aber irgendwann auch mit diesen Systemen in akzeptabler Zeit nicht mehr exakt lösbar. Deshalb muss auf Heuristiken zurückgegriffen werden, welche aber je nach Anwendungsfall und Heuristik nicht immer die optimalen Ergebnisse liefern. Eine praktikable Umsetzung des zuvor beschriebenen TSP für die Ermittlung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge wird in Kapitel 5.1.2 beschrieben.

4.4 Weitere Themengebiete

Neben den zuvor behandelten drei wesentlichen Themengebieten der „Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten“ finden sich nachfolgend noch fünf weitere Abschnitte, welche die Methode komplettieren sollen. Diese stehen aber nicht im Fokus dieser Arbeit, da eine Umsetzung der darin beschriebenen Verfahren zum aktuellen Zeitpunkt nicht sinnvoll durchführbar beziehungsweise zumeist nicht entscheidend für eine Optimierung technischer Nebenzeiten ist. Sie werden deshalb nur kurz beschrieben.

4.4.1 Steuerungsparametrierung

Die zuvor schon in Kapitel 3.2.3 beschriebene Steuerungsparametrierungsdatei dient zur Anpassung der Steuerung beziehungsweise des CNC-Kerns an die Werkzeugmaschine (vgl. Siemens 2013f, S. 165). So werden hier beispielsweise die Dynamik der Achsen beschrieben oder Systemtakte konfiguriert. Die Parametrierung der Steuerung erfolgt im Allgemeinen durch den Werkzeugmaschinenhersteller. Da eine Anpassung vieler Parameter zu einem unerwünschten Verhalten, erhöhtem Verschleiß oder Beschädigung der Werkzeugmaschine führen kann, ist es für den Prozesseigner zumeist nicht ratsam, Parameter einfach zu ändern. Zusätzlich kann es durch eine Veränderung gewisser Maschinenparameter in der Werkzeugmaschine auch zu einer Verletzung der integrierten Schutzmechanismen und Überwachungsfunktionen kommen, wodurch eine Wiederinbetriebnahme erst nach einer neuen Sicherheitsabnahme möglich wäre. Der wesentliche Teil der Maschinen- und Settingdaten ist deshalb nicht durch den Prozesseigner selbstständig veränderbar. Vielmehr kann eine Anpassung immer erst nach Rücksprache mit dem Maschinenhersteller erfolgen, um mögliche negative Auswirkungen abschätzen zu können.

Für eine Reduktion technischer Nebenzeiten würden sich prinzipiell eine sehr große Anzahl an Parametern eignen. Eine explizite und umfassende Darstellung zur Verfügung ste-

hender Optimierungsmöglichkeiten ist aber nicht Ziel dieser Arbeit. Vielmehr dient dieser Abschnitt zum besseren Verständnis der vorhergehend und nachfolgend beschriebenen Programmierbefehle der NC-Sprache.

Viele dieser Befehle sind in ihrer Funktionsweise durch ihre Parametrierung in der Steuerungsparametrierungsdatei maßgeblich beeinflussbar. Die Nutzung des selben Befehls in einem NC-Programm kann damit auf verschiedenen Werkzeugmaschinen auch unterschiedliche Reaktionen hervorrufen. Nur wenn dies dem Anwender bewusst ist, kann er auch eine zufriedenstellende Optimierung technischer Nebenzeiten erreichen. Welche Anpassungsmöglichkeiten durch die Parametrierung der NC-Befehle möglich ist, wird im jeweiligen Abschnitt mit dem NC-Befehl gemeinsam beschrieben.

4.4.2 Anforderungsgerechte Parametersatzanzwahl

Eine Besonderheit der Siemens Sinumerik-Steuerungen stellt die Möglichkeit dar, differierende Parametersätze für Achsen und Spindeln anzulegen und diese während des Programmablaufs durchwechseln zu können. Hierfür dürfen pro Achse sechs Parametersätze angelegt werden (vgl. Siemens 2013f, S. 167f). Durch den Wechsel auf einen anderen Parametersatz, welcher durch einen Befehl im NC-Programm ausgelöst wird, lässt sich das Verhalten des Lagereglers an wechselnde Anforderungen anpassen. So lassen sich beispielsweise der k_v -Faktor oder die Genauhaltfenster verändern. Daneben lässt sich auch die Dynamik einer oder mehrerer Achsen bearbeitungsparallel verändern, um so auf Spezifika der Fertigungstechnologie oder des Werkstücks reagieren zu können (vgl. Siemens 2013a, S. 461f). So kann die Achsbeschleunigung bei sehr schweren Werkzeugen reduziert werden, um zum Beispiel einem sehr hohen Massenträgheitsmoment gerecht zu werden.

Auch die Beladung der Werkzeugmaschine mit einem Werkstück und dem passenden Spannsystem hat maßgeblichen Einfluss auf die Bearbeitungszeit und die Fertigungsgenauigkeit. Um auf unterschiedlich schwere Werkstücke Rücksicht zu nehmen, bieten einige Werkzeugmaschinenhersteller die Möglichkeit, die den Maschinentisch bewegenden Achsen anhand von Beladungsklassen unterschiedlich zu parametrieren. Zumeist ist diese Klassifizierung aber sehr grob gewählt und spiegelt eher die maximale Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine wider als das Spektrum der Werkstücke, welche letztlich darauf hergestellt werden. Das Potenzial einer solchen Methode wird folglich nur unzureichend genutzt. Zwar gibt es auf dem Markt schon Software, welche die Parametrierung von Achsen und Spindeln automatisiert und die Werkzeugmaschine so selbstständig auf wechselnde Einflüsse reagieren lässt (vgl. Heidenhain 2014). Jedoch finden diese Produkte aber weitestgehend keine Verwendung in der Großserienfertigung. Auch die Nutzung der zur Verfügung stehenden anforderungsgerechten Parametersatzanzwahl findet kaum Anwendung, wohl bedingt

durch den deutlich vergrößerten Inbetriebnahmeaufwand. Gerade aber bei modernen Fertigungssystemen, welche hochflexibel gestaltet wurden, sind unterschiedlichste Werkzeuge im Einsatz, um verschiedenste Werkstücke auf einer Werkzeugmaschine zu fertigen. Damit ist deutlich zu erkennen, dass eine Parametrierung, welche sich wechselnden Anforderungen anpassen kann, auch große Optimierungspotenziale birgt. Prinzipiell lässt sich dieser Ansatz der anforderungsgerechten Parametersatzanwahl auch noch weiter entwickeln - hin zu einer werkzeug- und werkstückspezifischen Parametrierung der Werkzeugmaschine. Hierauf wird nochmals ausführlicher in Kapitel 8.2 eingegangen.

4.4.3 Hilfsfunktionen

Unter dem Begriff der „Hilfsfunktionen“ ist laut der Siemens AG eine spezielle Gruppe von NC-Befehlen zu verstehen. Mit ihnen „wird der SPS zeitgerecht mitgeteilt, wann das Teileprogramm bestimmte Schalthandlungen der Werkzeugmaschine durch die SPS vornehmen lassen will“ (Siemens 2013c, S. 359). An einer Siemens Sinumerik 840D werden dabei sechs Arten von Hilfsfunktionen unterschieden: Werkzeugwahl, Werkzeugkorrektur, Vorschub, Spindeldrehzahl, M-Funktionen und H-Funktionen. Die letzten beiden Arten von Hilfsfunktionen, M- und H-Funktionen, werden laut DIN (1988) auch als „primäre und sekundäre Zusatzfunktionen“ bezeichnet. Sie unterscheiden sich neben ihrer eigentlichen Wirkung auch im Zeitpunkt und der Dauer der Auswirkung. So wird in der DIN-Norm von einer Ausführung während des NC-Satzes und nach diesem gesprochen. Bei der Dauer wird in Zusatzfunktionen unterschieden, welche nur in dem Satz gültig sind, in welchem sie programmiert wurden oder solange gültig sind, bis sie widerrufen werden.

Hilfsfunktionen, beispielsweise einer Siemens CNC, können dagegen noch weiter differenziert werden. So ist in Ergänzung des Ausführungszeitpunktes auch eine Ausgabe zu Beginn des NC-Satzes möglich. Weiterhin kann durch die Steuerungsparametrierungsdatei auch festgelegt werden, ob durch die Hilfsfunktion auch ein impliziter Satzvorlaufstopp ausgelöst wird (vgl. Kapitel 4.4.5). Das wichtigste Differenzierungsmerkmal stellt aber wohl die Möglichkeit der „schnellen Funktionsausgabe“ dar. Hierbei wird, ohne auf eine Ausführungsbestätigung der SPS zu warten, der Programmablauf fortgesetzt. Einzig die Transportquittung muss abgewartet werden (vgl. Siemens 2013c, S. 361). Auch CNCs von Bosch Rexroth unterscheiden in quittungspflichtige und nicht-quittungspflichtige Hilfsfunktionen (vgl. Bosch Rexroth 2004, S. 95). Zusammengefasst ergibt sich damit prinzipiell eine Vielzahl an möglichen Einstellungen einer jeden Hilfsfunktion, welche bei der Parametrierung und Programmierung der CNC unbedingt beachtet werden müssen. Eine Übersicht der Einstellungsmöglichkeiten ist in Abbildung 4.12 zu finden. Hinzu kommt außerdem die Position im NC-Programm, auf welche schon in Kapitel 4.2.1 eingegangen wurde.

Zwar gibt es auch hierbei einige Ausnahmen. So dürfen spezielle Hilfsfunktionen, wie der Programmhalt (M0) nicht angepasst werden. Andere Hilfsfunktionen wiederum werden aber durch den Maschinenhersteller maschinenspezifisch beschrieben und erhalten damit auch eine individuelle Parametrierung. Ob eine programmierte Hilfsfunktion dann einen impliziten Vorlaufstopp auslöst oder als schnelle Funktionsausgabe genutzt werden darf, liegt damit im Ermessen des Maschinenherstellers. Erfolgt die Erstellung der NC-Programme durch den Anwender, kann dieser aber zumeist nicht direkt erkennen, welches Verhalten die Hilfsfunktion neben ihrer eigentlichen Auswirkung zeigen wird. So kann dies dazu führen, dass diese Potenziale zur Reduktion technischer Nebenzeiten nicht genutzt werden - potenziell auch aus Sorge, eine unvorhergesehene Reaktion der Werkzeugmaschine und damit vielleicht auch eine Kollision herbeizuführen.

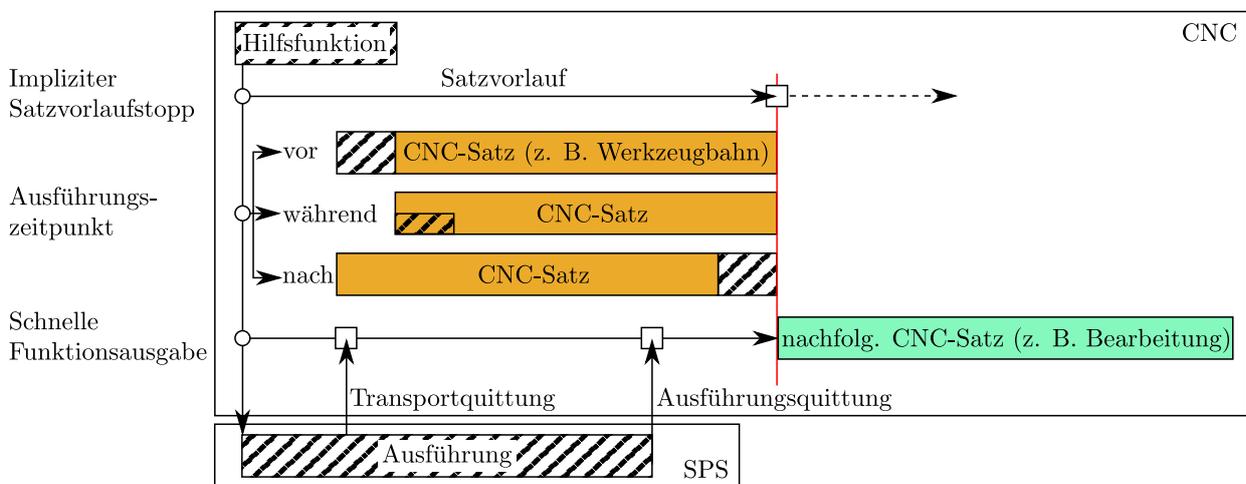


Abbildung 4.12: Darstellung der Beeinflussungsmöglichkeiten bei Hilfsfunktionen (vgl. Siemens 2013c, S. 359)

Vielfach kann die Frage, ob die schnelle Funktionsausgabe überhaupt aktiviert werden darf, nicht direkt beantwortet werden. Aus dem Gedanken heraus, ein unvorhergesehenes Maschinenverhalten zu vermeiden, werden die maschinenspezifischen Hilfsfunktionen auf maximale Sicherheit parametrierung. Die Hebung von Optimierungspotenzialen bleibt damit vorerst verwehrt. Eine neue Parametrierung der Hilfsfunktionen sollte aber immer nur in Rücksprache mit dem Maschinenhersteller erfolgen. Typische Beispiele solcher zu betrachtenden Hilfsfunktionen sind: das Schließen einer Zwischentür zwischen Arbeits- und Beladerraum, das Ausschalten von Kühlschmiermittelduschen und der Spindelhalt. Prinzipiell könnte bei all diesen Beispielen auf eine Ausführungsquittung verzichtet werden, da ein exakter Ausführungszeitpunkt unerheblich ist. Jedoch muss die tatsächliche Ausführung zu einem späteren Zeitpunkt überprüft werden. Dies müsste aber nicht zwangsweise im NC-Satz erfolgen, in welchem auch die Ausführung programmiert wurde. Vielmehr könnte dies auch in einem nachfolgenden NC-Satz durch die Überprüfung einer Zustandsvariablen geschehen.

4.4.4 Wartemarken und Kanalsynchronisation

Unter der Kapitelüberschrift „Wartemarken und Kanalsynchronisation“ ist eine Vielzahl verschiedener NC-Befehle zusammengefasst. Eine erste Unterteilung kann hierbei in NC-Befehlen erfolgen, welche nur eine Auswirkung auf den NC-Kanal haben, in dessen NC-Programm sie auch stehen. Andererseits existieren auch NC-Befehle, welche das NC-Programm eines Kanals solange anhalten, bis ein Ereignis in einem anderen Kanal eingetreten ist. Die Wartemarke ist dann kanalübergreifend.

In erster Linie finden die Befehle zur programmierten Verweilzeit in NC-Programmen der Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten Verwendung. Durch die DIN-Norm wurde der Verweilzeit der NC-Befehl „G4“ zugewiesen (vgl. DIN 1983, S. 12). Hierbei wird weiter in Verweilzeiten differenziert, welche in Sekunden oder Spindelumdrehungen programmiert werden. Bei beiden Verweilzeiten handelt es sich aber um feste Zeitintervalle, welche sich nur durch eine Programmanpassung verändern können. Sie werden zumeist dann eingesetzt, wenn auf etwas gewartet werden muss, das in keinem direkten Bezug zum NC-Programm steht. So kann nach dem Spülen des Werkstücks eine Verweilzeit notwendig werden, um ein ausreichendes Abfließen des Kühlschmiermittels zu ermöglichen. Eine Verweilzeit in Spindelumdrehungen ist häufig in der Umkehrbewegung bei Erreichen des Grunds einer Bohrung zu finden. Vielfach sind solche Verweilzeiten aber auch an anderen Stellen in NC-Programmen zu finden, vor allem dann, wenn die NC-Programme schon längere Zeit in der Großserienfertigung eingesetzt werden und damit einer gewissen Weiterentwicklung unterlagen (vgl. Kapitel 4.1). Ein Grund für die Verwendung des NC-Befehls ist meist nicht mehr zu erkennen. Die Länge einer solchen Verweilzeit kann beliebig gewählt werden und ist in vielen Fällen damit auch willkürlich. Viele Verweilzeiten besitzen keine technische Grundlage und führen damit zu unnötigen technischen Nebenzeiten.

Neben der programmierten Verweilzeit stehen dem Anwender auch andere NC-Befehle zur Verfügung. Das Warten auf das Bewegungsende einer Achse oder eine bedingte Schleife stellen zwei Beispiele dieser Befehle dar. Gerade die Möglichkeit, NC-Programme so zu erstellen, dass sie in ihrer Struktur modernen Computerhochsprachen sehr nahe kommen, birgt aber auch die Gefahr, durch Schleifen oder andere Konstrukte unnötige Wartezeiten zu verursachen.

Den auf einen Kanal begrenzten Wartemarken stehen NC-Befehle gegenüber, welche auf das Eintreten eines Ereignisses in einem anderen Kanal warten und so der Synchronisation von Kanälen dienen. Solche Befehle besitzen vor allem dann eine große Bedeutung, wenn die Werkzeugmaschine mehrere unabhängig von einander agierende Systeme besitzt. Dies ist maßgeblich bei Drehmaschinen zu finden, wo mehrere Werkzeugschlitten parallel Bearbeitungen durchführen. Bei einer Bearbeitung mit rotierendem Werkzeug sind dagegen

mehrere Kanäle nur selten zu finden. Eine Ausnahme bildet dabei das Werkzeugwechselsystem in einem getrennten Kanal mancher Maschinenhersteller. Trotzdem gilt auch hier, dass eine schlechte Abstimmung der einzelnen NC-Programme zu übermäßig großen Wartezeiten führen kann.

Weiterhin bieten einige CNCs auch die Möglichkeit, Wartemarken mit oder ohne einem impliziten Satzvorlaufstopp zu programmieren. Dieses Thema soll im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert werden.

4.4.5 NC-Satzvorlauf und Programmvorverarbeitung

Viele der aktuellen CNCs besitzen einen NC-Satzvorlauf, welcher vor dem NC-Hauptlauf eine gewisse Vorverarbeitung des NC-Programms vornimmt. Dabei wird, je nach Parametrierung der CNC, bis zu einer gewissen Anzahl an Sätzen (bis zu 1000) voraus gelesen (vgl. Bosch Rexroth 2004, S. 287f). In der Literatur wird für diese Steuerungsfunktion kein einheitlicher Begriff verwendet. Die Bezeichnung „NC-Satzvorlauf“ orientiert sich an der Wahl der Siemens AG. Daneben existieren auch noch Begriffe wie „Satzvorausschau“ (Bosch Rexroth 2011, S. 235f) und „Satzverarbeitung“ (Schröder 2007, S. 31). Die Funktion des NC-Satzvorlaufs kann dabei in zwei Teilbereiche aufgegliedert werden: Die Bahnplanung, von Schröder auch als „LookAhead“ (Schröder 2007, S. 45) bezeichnet, dient dazu, die Trajektorie zu bestimmen. Hierfür werden der absolute Start- und Endpunkt der Bewegung im Raum, ein Geschwindigkeitsprofil und gegebene Bahnparameter zur Berechnung herangezogen (Schröder 2007, S. 31). Dadurch kann eine Werkzeugbahn erzeugt werden, welche trotz vieler einzeln programmierter Segmente über eine gleichmäßige und hohe Geschwindigkeit verfügt. Bei Fräsbearbeitungen können so bessere Oberflächenqualitäten erzielt werden (vgl. Siemens 2010a, S. 145). Im zweiten Bereich des NC-Satzvorlaufs werden NC-Befehle ausgeführt, die keine Bahninformationen besitzen. Dabei können beispielsweise Variablen neu beschrieben oder Eingangssignale ausgelesen werden (vgl. Bosch Rexroth 2011, S. 217). Beide Funktionen des Satzvorlaufs führen damit auch zu einer schnelleren Abarbeitung des NC-Codes und zu dynamischeren Werkzeugbahnen.

In manchen Fällen kann der Satzvorlauf aber zu einem unbeabsichtigten Verhalten der Werkzeugmaschine führen. Deshalb gibt es NC-Befehle, mit welchen ein NC-Satzvorlaufstopp explizit ausgelöst wird (vgl. Siemens 2013a, S. 467). Der Vorlauf wird dann solange angehalten, bis auch der Hauptlauf den NC-Satz mit diesem Befehl erreicht hat. Danach eilt der NC-Satzvorlauf wieder voraus und füllt seinen Vorlaufspeicher - bis zum Programmende oder nächsten Satzvorlaufstopp. Daneben existieren eine Vielzahl weiterer Befehle, welche neben ihrer eigentlichen Funktion auch implizit einen Vorlaufstopp herbeiführen. Meist ist dies vom Steuerungshersteller so gewünscht, um ein unbeabsichtigtes Steuerungsverhalten

zu unterbinden. Bei manchen NC-Befehlen lässt sich aber auch durch die Parametrierung frei entscheiden, ob ein Vorlaufstopp mit dem Befehl einher gehen soll. Ein Beispiel für diese Entscheidungsfreiheit stellen die Hilfsfunktionen dar (vgl. Siemens 2010a, S. 441f). Daneben gibt es auch einige NC-Befehle, welche vordergründig die gleiche Funktion auslösen, jedoch ergänzend mit einem implizitem Vorlaufstopp. Dies gilt zum Beispiel für die Befehle „M17“ und „RET“ einer Siemens CNC, welche beide ein Unterprogramm beenden (vgl. Kapitel 2.2.4).

Bei der Betrachtung vieler NC-Programme der automobilen Großserienfertigung fällt auf, dass der Befehl zur expliziten Auslösung eines Vorlaufstopps relativ häufig Anwendung findet. Allerdings ist die Verwendung nicht immer technisch zu begründen. Ohne den NC-Befehl würde sich kein Unterschied in der Reaktion der Werkzeugmaschine ergeben, jedoch zu einer schnelleren Verarbeitung der NC-Sätze führen. Dies kann in vielen Fällen auch zu einer merklichen Reduktion der technischen Nebenzeiten führen, da unnötige Stillstände oder Verlangsamungen unterbunden werden. Warum ein expliziter Vorlaufstopp trotzdem so oft verwendet wird, kann wohl nur mit Missverständnis des Satzvorlaufs und damit verbundenem, falschen Sicherheitsdenken begründet werden. Auch die Verwendung von NC-Befehlen, welche implizit einen Satzvorlaufstopp auslösen, obwohl alternative Befehle existieren, kann vielfach nur durch Unkenntnis des Anwenders begründet werden. Dies ist aber auch das Resultat der sehr umfangreich gewordenen NC-Sprache, welche sich zusätzlich je nach Hersteller der CNC deutlich unterscheiden kann.

Eine weitere Möglichkeit, die Abarbeitung von NC-Programmen zu beschleunigen, ist durch die Vorverarbeitung von Teilprogrammen gegeben. Die ausgewählten NC-Programme werden vor ihrem Einsatz im Bearbeitungsprogramm - zum Beispiel beim Hochlauf der CNC - kompiliert und als ein dem Anwender verborgener Compile-Zyklus abgelegt (vgl. Siemens 2013d, S. 789ff). Die Steuerungsfunktionalität bleibt davon unbeeinflusst. So kann das vorverarbeitete NC-Programm immer noch auf Eingangssignale reagieren und gegebenenfalls Kontrollstrukturen, wie bedingte Anweisungen, verändert durchlaufen. Ein deutlicher Effekt in der Reduktion technischer Nebenzeiten zeigt sich dann, wenn rechenintensive und komplexe Hochsprachenelemente verwendet werden.

Allerdings hat sich anhand der in der automobilen Großserienfertigung genutzten Anwenderzyklen gezeigt, dass eine Vorverarbeitung kaum zu einer Auswirkung führt. So wurden die in Kapitel 6.1.2 vorgestellten Zyklen zur Erzeugung einer Werkzeugbahn vorab kompiliert und mittels eines NC-Bearbeitungsprogramms der Großserienfertigung ausgeführt. Eine Reduktion technischer Nebenzeiten konnte jedoch nicht erkannt werden. Viele der Zyklen und Bearbeitungen sind in ihrer Berechnung nicht sehr komplex und können damit auch durch den NC-Satzvorlauf ausreichend weit vor dem Hauptlauf vorverarbeitet werden. Dies kann sich aber bei speziellen Sonderprozessen auch different darstellen.

4.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde die „Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten“ behandelt, welche sich insgesamt aus acht Teilbereichen zusammensetzt. Insbesondere die drei Bereiche „programmierter Sicherheitsabstand“, „Werkzeugbahn“ und „Bearbeitungsreihenfolge“ sind obligatorisch für eine zufriedenstellende Optimierung technischer Nebenzeiten. Außerdem gehören zu dieser Methode auch fünf weitere Bausteine, welche die Methode komplettieren sollen. Sie besitzen im Allgemeinen aber nicht das Vermögen, technische Nebenzeiten deutlich beziehungsweise mit vertretbarem Aufwand zu reduzieren. So sind „Wartemarken und Kanalsynchronisation“ nicht wesentlich bedeutend bei der Reduktion technischer Nebenzeiten - sollten sie nicht exzessiv angewendet worden sein. Eine auf den Fertigungsprozess vollständig angepasste „Steuerungsparametrierung“ böte zwar das Potenzial, technische Nebenzeiten deutlich zu reduzieren, jedoch nur durch einen stark vergrößerten Inbetriebnahmeaufwand und nur in Kooperation mit dem Maschinenhersteller. Zuletzt versteht sich diese Methode nicht als unveränderlich - vielmehr ist absehbar, dass sie durch technische Veränderungen der CNCs auch Anpassungen und Ergänzungen erfahren wird. Die „Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten“ ist in Abbildung 4.13 nochmals zusammengefasst.

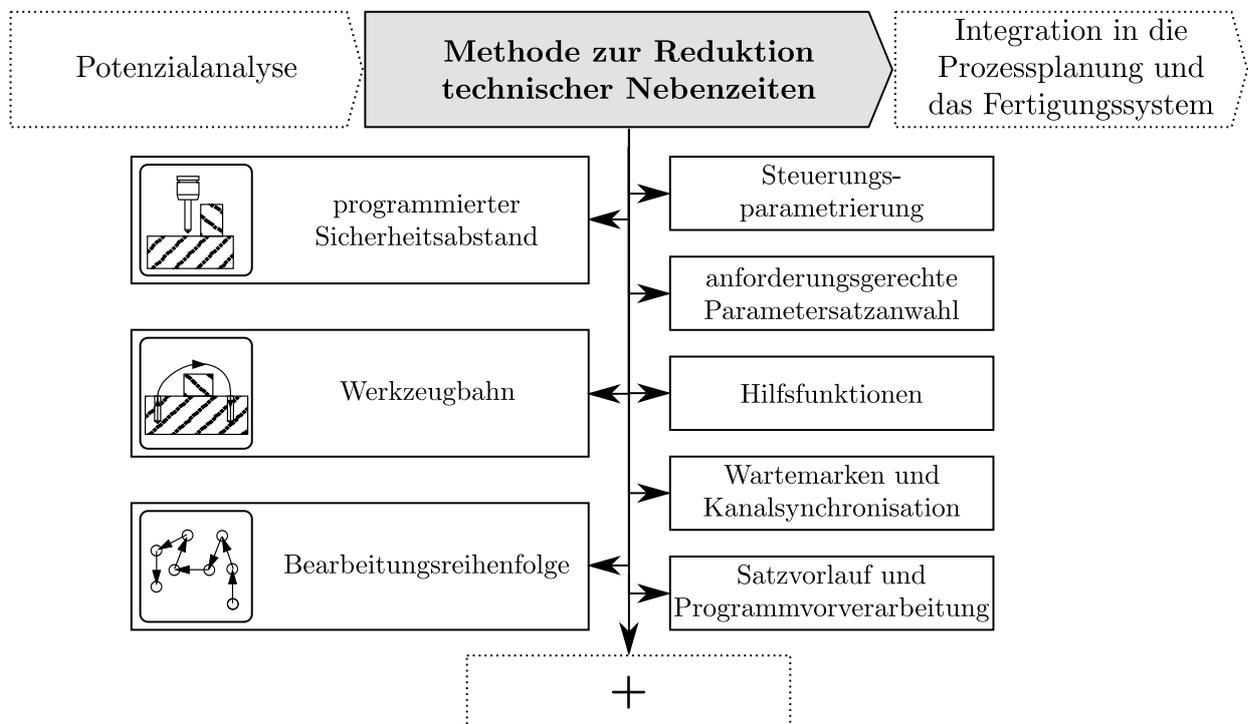


Abbildung 4.13: Teilgebiete der eigentlichen Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten

5 Integration in die Prozessplanung

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Integration der zuvor dargestellten „Potenzialanalyse“ und „Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten“ für zwei Unternehmensbereiche behandelt. Ferner werden die Möglichkeiten der Integration in die Prozessplanung und das Fertigungssystem beschrieben. Dafür erfolgt für beide Unternehmensbereiche eine Erläuterung ihrer Art und Anforderungen. Daran anknüpfend werden jeweils zwei Beispiele aufgezeigt, mit welchen es möglich ist, ausgewählte Analyse- und Optimierungsverfahren in die Prozessplanung und das Fertigungssystem zu integrieren. In diesem Kapitel ist die Integration in die Prozessplanung beschrieben, daran schließt sich das Kapitel der Integration in das Fertigungssystem an.

Im Gegensatz zum Fertigungssystem können Optimierungspotenziale in der Prozessplanung schon weit vor der Inbetriebnahme eines Fertigungssystems erkannt und gehoben werden. Eine Erfassung, Analyse und Optimierung technischer Nebenzeiten kann aber nur sinnvoll erfolgen, wenn dem Anwender Unterstützung gegeben wird. Ohne eine solche Unterstützung wäre ein Großteil der zuvor vorgestellten Verfahren in ihrer Anwendung zu komplex und zu umfassend. Für eine Integration in die Prozessplanung konnten fünf mögliche Wege identifiziert werden:

- die detaillierte Beschreibung einzelner Verfahren in den dem Anwender zur Verfügung stehenden Anleitungen und Informationsblättern
- die Entwicklung neuer eigenständiger Software für den Gebrauch auf normalen Personal Computern
- die Integration von Zusatzsoftware (Addons) in die im Gebrauch befindlichen CAD-CAM-Systeme
- die Anpassung und Erweiterung des Postprozessors, welcher die Informationen aus einem CAD-CAM-System in ein maschinen- und steuerungsspezifisches NC-Programm umwandelt (vgl. Abbildung 4.3)
- die Ergänzung der Lieferantenvorschriften um neue Anforderungen an ein durch den Maschinenhersteller zu lieferndes NC-Programm

Die Erstellung von Anleitungen, welche einzelne Verfahren erläutern und anhand von Beispielen beschreiben, stellt den einfachsten Fall einer Umsetzung dar. Auf Grund der Vielzahl zur Verfügung stehender Optimierungsverfahren erweist sich dieser Weg als nicht unbedingt sinnvoll. Der Einarbeitungsaufwand wäre immens und würde viel Zeit in Anspruch nehmen. Dieser Weg eignet sich deshalb nur für wenige, komplexe Verfahren.

Die Möglichkeit der Entwicklung eigenständiger Software kann dazu genutzt werden, einzelne Verfahren oder eine Gruppe mehrerer Verfahren in ein Computerprogramm umzusetzen. Dadurch wäre es möglich, Optimierungspotenziale aufzuzeigen und auch automatisiert zu heben. Außer der grundlegenden Voraussetzung, eine Programmiersprache wie C# oder VisualBasic zu beherrschen, gibt es kaum weitere Anforderungen. Nachteilig an diesem Weg ist aber ganz sicher die Abkehr von schon vorhandenen Computerprogrammen. Zwar kann dieser Umstand durch die Schaffung von Schnittstellen zu anderen Computerprogrammen gemildert werden, doch finden neue, eigenständige Computerprogramme im Unternehmen oftmals keine ausreichende Akzeptanz und bedienen damit nur eine kleine Nische.

Dem gegenüber steht als dritter Weg die vollständige Integration von Zusatzsoftware in bestehende CAD-CAM-Systeme. Hierdurch wäre es möglich, auf die Bereitstellung neuer, eigenständiger Computerprogramme zu verzichten und so die Anwendungsschwelle deutlich zu senken. Trotzdem muss auch hier gelten, dass sich bei der Anwendung kein erheblicher Mehraufwand ergeben darf, da sonst auch die Addons keine Anwendung finden würden. Eine Schnittstellenproblematik zu anderen Computerprogrammen könnte durch eine Integration zumeist vermieden werden. Jedoch erfordert eine Integration auch einen deutlichen Mehraufwand bei der Programmerstellung gegenüber völlig eigenständigen Programmen. Viele CAD-CAM-Systeme gestatten eine Erweiterung nur an wenigen definierten Stellen und setzen die Verwendung der eigenen, manchmal auch speziellen, Programmiersprache voraus.

Die Erweiterung des Postprozessors, welcher für die Ableitung des steuerungs- und maschinenspezifischen NC-Programms zuständig ist, stellt einen sehr speziellen Weg der Integration in die Prozessplanung dar. Dieser Weg würde sich nur für Optimierungsverfahren eignen, da eine Potenzialanalyse schon zuvor, also im CAD-CAM-System erfolgen müsste. Durch die Anpassung des Postprozessors könnte erreicht werden, dass NC-Programme schon bei ihrer erstmaligen Ableitung einem Programmierstandard folgen, welcher die Möglichkeiten der Reduktion technischer Nebenzeiten abbildet.

Zuletzt ist die Aufnahme weiterer Bedingungen in die Lieferantenvorschriften bei der Beschaffung neuer Werkzeugmaschinen denkbar. Dies kann natürlich nur Wirkung zeigen, wenn auch das NC-Programm vom Maschinenhersteller mit eingekauft wird. Grundsätzlich gibt es in den Lieferantenvorschriften teilweise schon eine Forderung nach einer einheitlichen Programmstruktur und Einhaltung bestimmter Programmierregeln. Jedoch könn-

ten auch Teile der in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehensweisen als Programmierregeln in die Lieferantenvorschriften aufgenommen werden. Auch könnte gefordert werden, bei der Inbetriebnahme die Parametrierung der CNC in Hinblick auf technische Nebenzeiten zu optimieren.

5.1 Umsetzung der Integration

Die beiden nachfolgend vorgestellten Beispiele versuchen den zuvor beschriebenen Anforderungen an eine Integration in die Prozessplanung gerecht zu werden. Im ersten Beispiel wird ein Computerprogramm zur Potenzialanalyse behandelt. Die Software „BESTWAY“, welche im zweiten Beispiel beschrieben wird, dient zur Bestimmung der schnellsten Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs (kurz Bearbeitungsreihenfolge) und zählt damit zu den Optimierungsverfahren. Beide Beispiele folgen dem zuvor beschriebenen zweiten Weg der Entwicklung eigenständiger Software. Die Entscheidung fiel auf diese Möglichkeit der Integration, da eine Umsetzung als Addon in die im Unternehmensumfeld verwendeten CAD-CAM-Systeme einen zu großen Aufwand bedeutet hätte.

5.1.1 Beispiel 1: Potenzialanalyse anhand des NC-Programmarchivs

Das in Kapitel 3.2 behandelte Verfahren zur Potenzialanalyse wurde in ein Computerprogramm für die Prozessplanung überführt. Ziel dieser Software ist das automatisierte Einlesen des NC-Programmarchivs mit anschließender automatischer Darstellung und Analyse der Daten. Auf der Maske „Maschine und Steuerung“ des „Potenzialanalysators“, dargestellt in Abbildung 5.1, wird zu Beginn das NC-Programmarchiv ausgewählt und eingelesen. Automatisch erfolgt dann eine Darstellung wichtiger Eigenschaften der durch den Anwender ausgewählten Werkzeugmaschine (grüne Felder) und der CNC.

In der Rubrik „Maschine“ finden sich grundlegende Informationen zur Werkzeugmaschine. Anhand des Maschinenherstellers, des Typs und der Anzahl der Achsen und Spindeln bekommt der Anwender schnell einen Überblick über den Aufbau der Werkzeugmaschine. Auch die für das TSP (vgl. Kapitel 4.3.2) wichtige Werkzeugwechselposition wird hier dargestellt. In der Rubrik „Steuerung“ werden Informationen über die an der Werkzeugmaschine eingesetzte CNC gegeben. Dazu zählen wesentliche Angaben, wie Hersteller und Typ, aber auch detaillierte Informationen zu Softwarestand und Systemtakt. Gerade solche Daten können für eine nachfolgende Optimierung sehr wichtig sein, da zum Beispiel ein zu alter Softwarestand Optimierungsverfahren aufgrund fehlender Funktionen ausschließen kann.

In der Rubrik „Maschinendynamik“ finden sich die wesentlichen Daten zur Maschinendynamik. Hier werden neben maximaler Geschwindigkeit, maximaler Beschleunigung und maximalem Ruck auch der k_v -Faktor, Achsgrenzen (Softwareendschalter) und Genauhaltfenster dargestellt. Zusätzlich erkennt die Software auch automatisch, ob die jeweilige Achse mit einem Linearantrieb ausgestattet ist. Mit diesen Daten ist es möglich, schnell die Maschinendynamik in ihrer Gesamtheit aber auch im Vergleich der einzelnen Achsen zu erkennen. Hierdurch kann die Effektivität einzelner Optimierungsverfahren, wie das der Vorzugsrichtung (vgl. Kapitel 4.3.1), erkannt werden. Einzig die Felder, die in Abbildung 5.1 grün hinterlegt sind, können durch die Software nicht bestimmt werden, da hierzu die Informationen im NC-Programmarchiv fehlen. Hier muss eine Eingabe durch den Benutzer über eine Dropdown-Liste erfolgen.

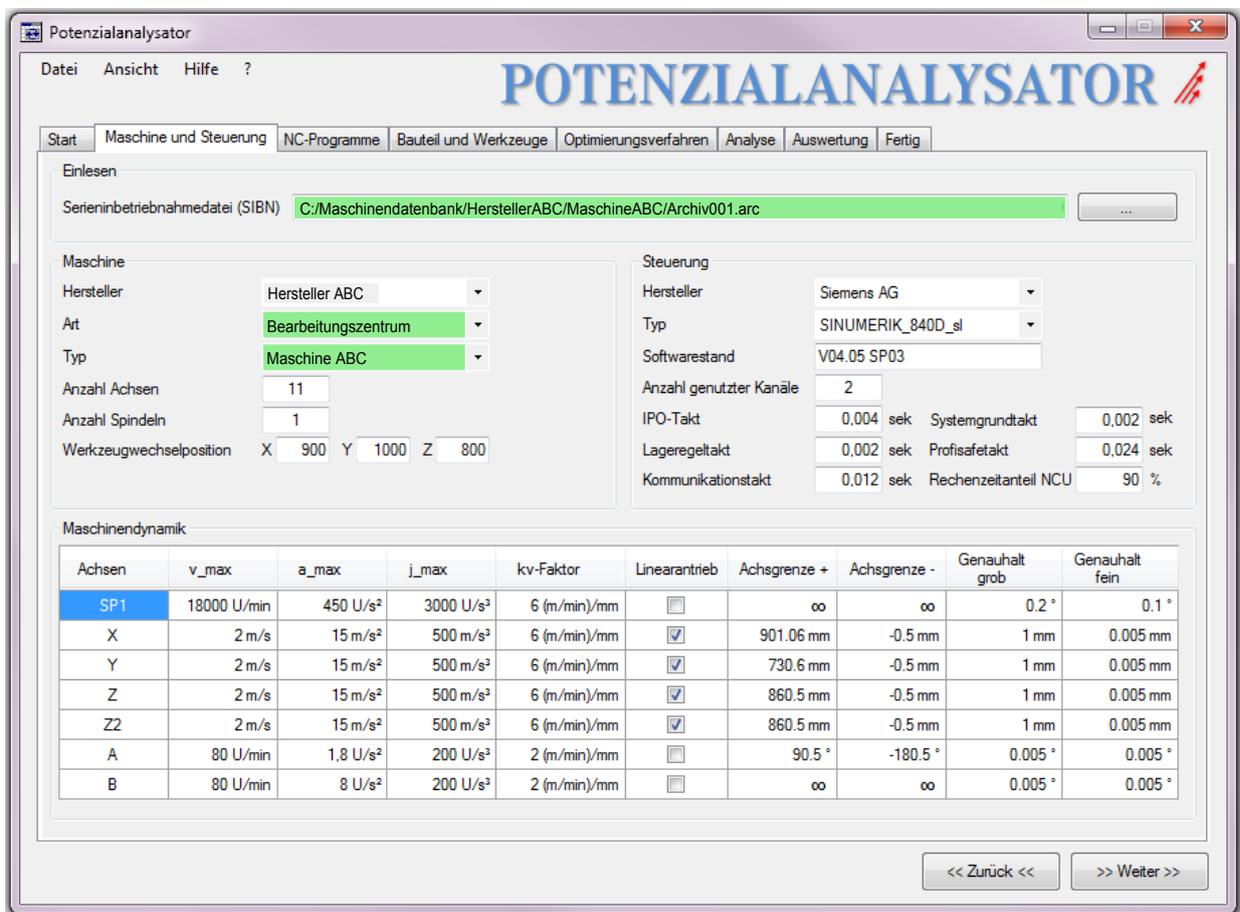


Abbildung 5.1: Potenzialanalysator - Maske „Maschine und Steuerung“

Auf der Maske „NC-Programm“, wie sie in Abbildung 5.2 dargestellt ist, werden Informationen zum NC-Bearbeitungsprogramm und den darin verwendeten Unterprogrammen und Zyklen dargestellt. Der Anwender muss zu Beginn das NC-Bearbeitungsprogramm auswählen, welches er betrachten möchte. Vielfach befinden sich in einem NC-Programmarchiv noch weitere NC-Bearbeitungsprogramme anderer Werkstücktypen oder Versionsstände.

Nach der Auswahl durch den Anwender erfolgt eine automatisierte Analyse des NC-Bearbeitungsprogramms. Neben grundlegenden Informationen, wie dem letzten Änderungsdatum, werden auch die verwendeten Unterprogramme und Zyklen erfasst. Dies ermöglicht dem Anwender, einen schnellen Überblick genutzter NC-Programme zu bekommen. Die Vielzahl oftmals ungenutzter Herstellerzyklen wird ausgeblendet.

Daneben befindet sich das Informationsfeld zum Verfahren der limitierten, unbestimmten Bahn. Der Potenzialanalysator erkennt die Anzahl der Aufrufe im NC-Bearbeitungsprogramm und zeigt diese an. Auch finden sich auf dieser Maske Informationen zum Werkzeugwechsel, wie Name und Anzahl der Aufrufe. Zusätzlich wird auch erkannt, ob eine „doppelte Werkzeuganwahl“ erfolgt. Dies bedeutet, dass ein Werkzeug angewählt, gegebenenfalls in einen Zwischengreifer überführt und dann wieder durch die Anwahl eines anderen Werkzeugs abgewählt wird. Dies stellt einen oftmals nach Programmänderungen auftauchenden Fehler dar. In der Gruppierung „Hauptprogramm“ werden Informationen zu Hilfsfunktionen, Eilgangbewegungen, Wartemarken, Satzvorlaufstopp, Schneidenanwahl und weiteren Funktionen dargestellt.

In der Tabelle zu Hilfsfunktionen werden alle im NC-Bearbeitungsprogramm und den darin genutzten Unterprogrammen und Zyklen verwendeten „M-Befehle“ aufgeführt. Da die Zuweisung dieser Befehle größtenteils durch den Maschinenhersteller individuell erfolgen kann, wurde eine für den Maschinentyp spezifische Datenbank hinterlegt. So erkennt der Anwender die Bedeutung der verwendeten Befehle, ohne im Maschinenhandbuch nachschauen zu müssen. Die Typisierung der Hilfsfunktionen in „nach DIN-Norm (D)“ und „nach Maschinenhersteller (H)“ weist darauf hin, dass viele Hilfsfunktionen auf anderen Werkzeugmaschinen eine gänzlich andere Bedeutung haben können. Wurde die Nutzung der „schnellen Funktionsausgabe (Quickfunktion)“ innerhalb der Steuerungsparametrierungsdatei für den jeweiligen Befehl unterdrückt, so wird dies durch einen fehlenden Haken dargestellt (vgl. Kapitel 4.4.3). Auch der Ausführungszeitpunkt und die Gesamtzahl der Aufrufe wird erfasst.

Die Gruppierung der Bewegungen im Eilgang und die unter „Sonstiges“ zusammengefassten Einträge zu „Polynomen“ und „Splines“ geben einen Hinweis auf die neben dem Feld der limitierten, unbestimmten Bahn verwendeten Befehle zur Werkzeugbahnerzeugung (vgl. Kapitel 4.3). Anhand der Gesamtzeit programmierter Wartezeiten in den NC-Programmen kann der Anwender schnell mögliche Potenziale erkennen. Die Gruppierung „Satzvorlauf“ enthält eine Auswahl häufig auftretender Befehle, welche explizit oder implizit zu einem Satzvorlaufstopp führen (vgl. Kapitel 4.4.5). Auch werden Eilgangbewegungen („G0“), die nicht mit der Werkzeugspitze („D1“) programmiert wurden („G0“ + „D2“), als problematisch aufgezeigt. Diese Art der Programmierung birgt eine erhöhte Kollisionsgefahr, da so kein direkter Zusammenhang mehr zum Sicherheitsabstand besteht (vgl. Kapitel 4.1).

Auf der nachfolgenden Maske „Bauteil und Werkzeug“ werden die aus dem NC-Programmachiv gewonnenen Informationen zu Bauteil und Werkzeug dargestellt. Dazu zählen die im Fertigungsprozess bearbeiteten Bauteilseiten und Details zu den einzelnen Werkzeugen, wie Anzahl der Bearbeitungsstellen und verwendete Fertigungsart. Zusätzlich kann der Anwender noch zusätzliche Informationen hinterlegen, wie den Vorbearbeitungsstand einer Werkstückoberfläche. Dies ist insbesondere bei der optimalen Wahl des programmierten Sicherheitsabstandes wichtig (vgl. Kapitel 4.1).

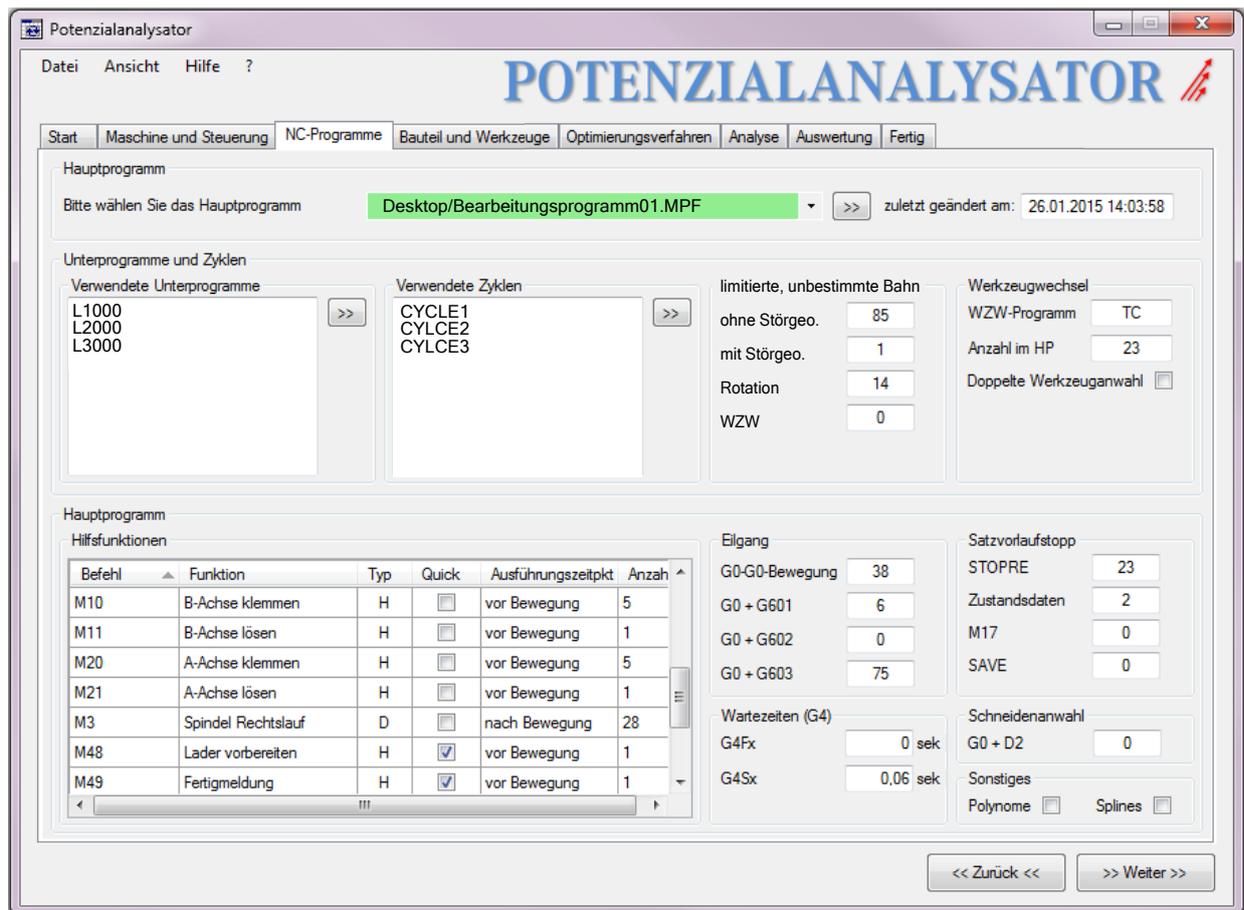


Abbildung 5.2: Potenzialanalysator - Maske „NC-Programme“

Die Maske „Optimierungsverfahren“ stellt dem Anwender alle zur Verfügung stehenden Verfahren zur Optimierung technischer Nebenzeiten dar. Hier kann anhand einer kurzen Beschreibung entschieden werden, ob das Verfahren überhaupt in Betrachtung gezogen werden soll. Ein Ausschluss einzelner Verfahren führt dazu, dass diese in der daran anknüpfenden Analyse nicht betrachtet werden. Während der Analyse erfolgt eine automatisierte Zuordnung der zuvor gewonnenen Informationen zu den Optimierungsverfahren. So kann für jedes einzelne Verfahren ein Optimierungspotenzial abgeschätzt und dem Anwender aufgezeigt werden. In der Auswertung erfolgt eine Klassifizierung in A-, B- und C-Verfahren. Ähnlich einer ABC-Analyse in der Betriebswirtschaft werden so die einzelnen Verfahren

mit einem Aufwand-Nutzen-Verhältnis verknüpft. Ein Verfahren, welches der Gruppe A zugeordnet wird, verspricht für den konkreten Anwendungsfall ein großes Potenzial bei relativ geringem Umsetzungsaufwand. Verfahren der Gruppe B besitzen ebenfalls ein hohes Potenzial, erfordern aber in ihrer Anwendung einen großen Aufwand. Gruppe-C-Verfahren versprechen nur einen geringen Optimierungserfolg und sollten deshalb nur dann Einsatz finden, wenn Verfahren der Gruppen A und B voll ausgeschöpft wurden.

Ein typisches Beispiel in einer solchen Auswertung stellt die Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs dar (vgl. Kapitel 4.3). Hier kann mit Hilfe der Software die Aufmerksamkeit des Anwenders auf die Werkzeuge gelenkt werden, für die eine Optimierung großes Potenzial verspricht. Dies kann über das Fertigungsverfahren und die Anzahl der Bearbeitungsstellen getan werden. Viele der eingesetzten Werkzeuge in der Fertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten besitzen nur wenige Bearbeitungsstellen und sind somit für eine Optimierung eher uninteressant. Zusätzlich kann in der Analyse auch die Dynamik der verschiedenen Maschinenachsen ausgewertet werden. So kann dem Anwender vorgeschlagen werden, eher das Verfahren der „Vorzugsrichtung“ (vgl. Kapitel 4.3.1) oder die Lösung eines TSP (vgl. Kapitel 4.3.2) zur Bestimmung der Bearbeitungsreihenfolge zu verwenden. Wie die Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge durch Lösung eines TSP softwaretechnisch umgesetzt werden kann, ist im nachfolgenden Abschnitt behandelt.

5.1.2 Beispiel 2: Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge

Das zweite Beispiel beschreibt die Integration eines Verfahrens zur Reduktion technischer Nebenzeiten in die Prozessplanung. Dazu wurde die Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge umgesetzt. Wie in Kapitel 4.3.2 dargelegt wurde, kann sich hierbei die Aufstellung und Lösung eines Travelling-Salesman-Problems empfehlen. Da eine Lösung solch eines TSP aber schon nach wenigen Punkten beziehungsweise Bearbeitungsstellen manuell kaum mehr möglich ist, liegt der Einsatz eines Computerprogramms nahe. Ein Programm, welches anhand der Achsdynamiken die schnellste Bearbeitungsreihenfolge zufriedenstellend bestimmen kann, konnte auf dem Softwaremarkt nicht identifiziert werden. Deshalb wurde ein eigenes System entwickelt.

In vorhergehenden Versuchen konnte ermittelt werden, dass eine exakte Lösung eines solchen TSP auch mit leistungsfähigen Computern schon bei geringer Anzahl an Punkten zu viel Zeit in Anspruch nimmt. So benötigte ein normaler Bürocomputer für die exakte Lösung eines TSP mit zwölf Punkten schon mehrere Minuten. Da bei der Fertigung von automobilen Antriebsstrangkomponenten aber auch weit komplexere Reihenfolgen auftreten

können, musste eine Alternative gefunden werden. Hierfür bot sich ein genetisch mutativer Algorithmus zur Näherungslösung des TSP an. Im Gegensatz zu einfacheren Näherungsverfahren, wie dem Nearest-Neighbor-Verfahren, liefert ein genetisch mutativer Algorithmus auch bei einer großen Anzahl an Punkten ein sehr gutes Ergebnis (vgl. Grötschel 2015, S. 108ff).

Wie in Abbildung 5.3 dargestellt, werden zu Beginn des Lösungsverfahrens zwei verschiedene Quellen herangezogen. Um die Dynamik der einzelnen Achsen der betreffenden Werkzeugmaschine zu erfassen, wird die vollständige Steuerungsparametrierungsdatei, wie sie auch in Kapitel 3.2.3 vorgestellt wurde, eingelesen. Da die gesuchten Parameter bei gleichem Steuerungshersteller auch immer die gleichen Namen tragen, können diese vollständig automatisiert eingelesen werden. Einzig die Werkzeugwechselposition wird von den Werkzeugmaschinenherstellern an unterschiedlichen Stellen in der Steuerungsparametrierungsdatei beschrieben und muss deshalb gegebenenfalls manuell eingetragen werden. Auch ist darauf zu achten, dass die Werkzeugwechselposition nicht immer eine X-, Y- und Z-Koordinate besitzt, da oftmals Achsen auch in den Maschinentisch und damit nicht in den Spindelturm integriert sind. Tritt dieser Fall ein, so sind nur die Achsen im Spindelturm für die Bewegung zur Werkzeugwechselposition relevant.

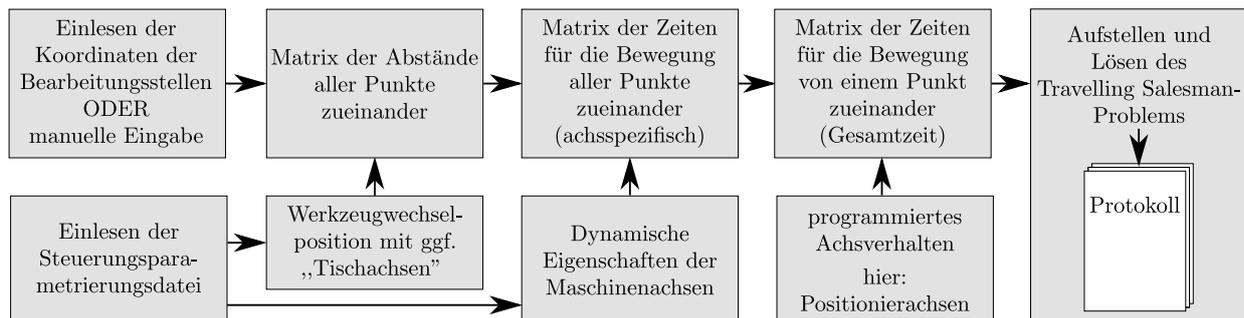


Abbildung 5.3: Ablaufdiagramm zur Lösung des Problems der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge

Für eine ausreichend genaue Berechnung der Bewegungszeiten genügt die Eingabe von maximaler Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck der relevanten Achsen (vgl. Kapitel 9.3). Zusätzlich ist es mit dem Computerprogramm möglich, die Maschinenparameter in eine Bibliothek abzulegen, um später schneller auf sie zugreifen zu können.

Als zweite Quelle werden die Koordinaten der Bearbeitungsstellen eines Werkzeugs eingelesen. Da die Ausgabe der Koordinaten aus vielen CAD-CAM-Systemen im XML-Format erfolgen kann, bietet es sich an, dass das Computerprogramm diese einlesen kann. Alternativ kann die Eingabe auch manuell durch Werteeingabe oder Klick in die Grafik erfolgen. Aus den eingelesenen Bearbeitungsstellen wird eine Matrix aufgestellt, welche die Abstände aller Bearbeitungsstellen zueinander aufzeigt - getrennt nach den einzelnen Achsen. Aus

diesen achsgebundenen Abständen können nun mit Hilfe der eingelesenen Maschinendynamik die Verfahrszeiten bestimmt werden. Geht man davon aus, dass eine Programmierung der Achsen im NC-Programm als „Positionierachsen“ erfolgt, so handelt es sich bei der Gesamtbewegung mehrerer Achsen um eine Überlagerung der Bewegung einzelner Achsen. Eine Interpolation findet dann nicht statt (vgl. Kapitel 4.2.3). Daraus resultiert für die Dauer einer Bewegung mehrerer Achsen, dass die längste Bewegungszeit einer Achse dominiert. So kann eine neue Matrix aufgestellt werden, welche die resultierenden gesamten Bewegungszeiten zwischen den Bearbeitungsstellen aufzeigt. Damit das TSP vollständig ist, fehlt noch die Werkzeugwechselposition. Sie ist der feste Start- und Endpunkt der Bearbeitungsreihenfolge. Auch hier müssen die Bewegungszeiten zu jeder Bearbeitungsstelle berechnet werden. Da die Dynamik der Achsen sowohl in die positive als auch in die negative Richtung gleich ist (vgl. Kapitel 4.3.2), handelt es sich hierbei um ein symmetrisches TSP.

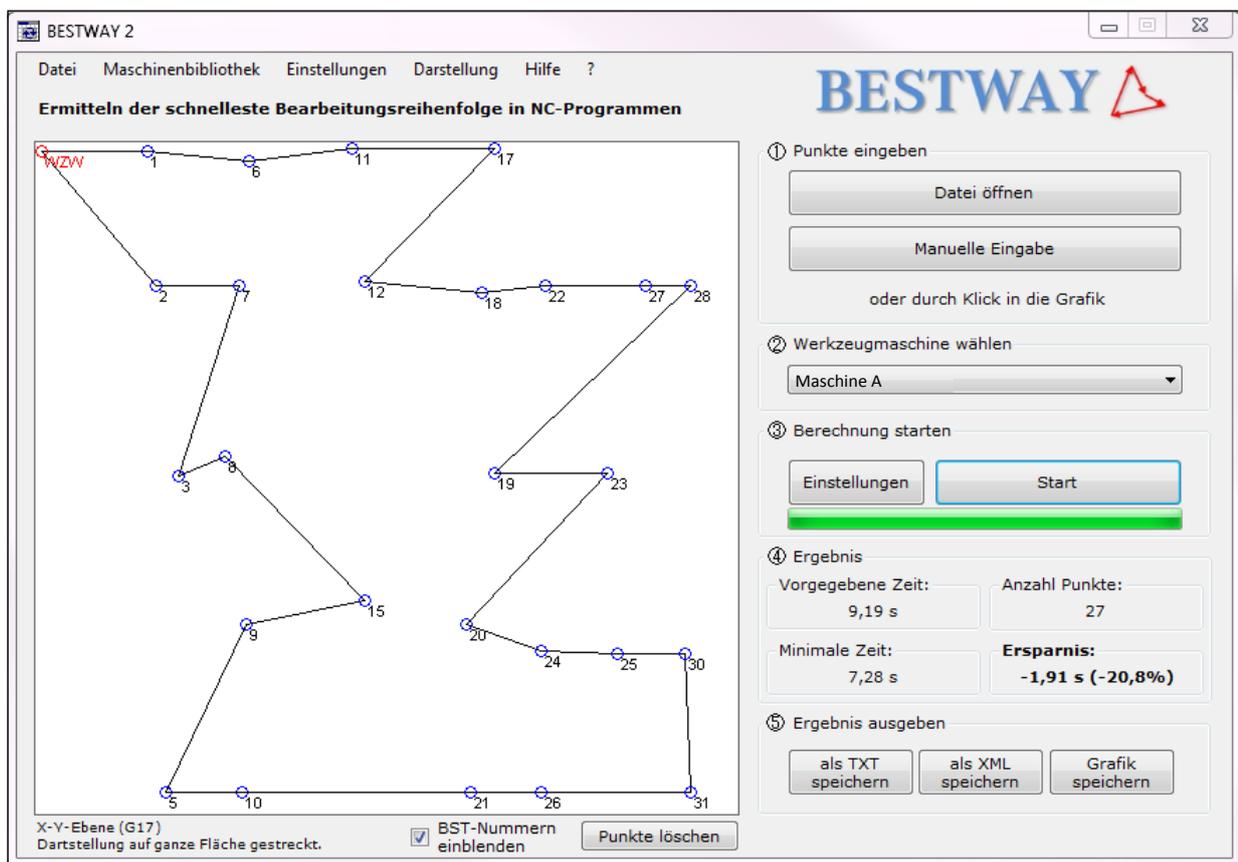


Abbildung 5.4: BESTWAY - Programmmaske

Zur Lösung des TSP wird nun ein genetisch mutativer Algorithmus herangezogen, welcher sich durch zufällige Veränderungen der exakten Lösung nähert. Weiterhin kann die Lösungsgüte des Algorithmus durch verschiedene Einstellungen, wie Mutationsrate und Abbruchkriterium, variiert werden. Die Berechnungsdauer, um zu einer sehr guten Lösung

zu gelangen, kann so auf wenige Sekunden reduziert werden. Das Resultat des Optimierungsproblems wird im Computerprogramm als einfache Grafik und auch als Zahlenwert des voraussichtlich zu hebenden Potenzials dargestellt. Zusätzlich kann die so ermittelte neue Bearbeitungsreihenfolge wieder in dem selben XML-Format ausgegeben werden, wie sie ursprünglich auch eingelesen wurde. Damit ist ein Import der optimierten Reihenfolge in ein CAD-CAM-System durchführbar.

Die in Abbildung 5.4 dargestellte Maske zeigt das Computerprogramm „BESTWAY“, welches in C# entwickelt wurde und nun im Unternehmen Anwendung findet. Das in dieser Abbildung gelöste Reihenfolgeproblem zeigt den konkreten Anwendungsfall am Schiebergehäuse eines Automatikgetriebes, wie er nachfolgend in Kapitel 7.1.1 behandelt wird. Dabei werden auch Sprünge in andere Bearbeitungsebenen berücksichtigt und damit die schnellste Bearbeitungsreihenfolge ermittelt.

5.2 Fazit

Mit den beiden zuvor gezeigten Beispielen der Integration in die Prozessplanung konnte dargelegt werden, dass sich sowohl Verfahren zur Potenzialanalyse als auch Optimierungsverfahren zur Umsetzung als Computerprogramme eignen können. Mit der Software „Potenzialanalysator“ wurde ein Computerprogramm entwickelt, welches in kürzester Zeit eine Vielzahl relevanter Informationen zur Werkzeugmaschine, zur CNC und zu NC-Programmen liefern kann. Diese Informationen nutzt das Programm, um Optimierungspotenziale zu erkennen und Vorschläge für eine Optimierung zu geben. Daran anknüpfend wurde unter dem Namen „BESTWAY“ ein Verfahren zur automatischen Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge unter Berücksichtigung der Maschinendynamik entwickelt. Durch die Möglichkeit, XML-Dateien einlesen zu können, ist eine Schnittstelle zu CAD-CAM-Systemen gegeben, wodurch ein Im- und Export von Bearbeitungsreihenfolgen einfach möglich ist.

Damit die Anwendungsschwelle und der Anwendungsaufwand noch weiter gesenkt werden können, ist es zwingend notwendig, möglichst alle zuvor vorgestellten Verfahren der Potenzialanalyse und Optimierung in die Prozessplanung zu integrieren. Nur so kann es gelingen, technische Nebenzeiten schon weit vor der Inbetriebnahme zu reduzieren beziehungsweise durch eine optimierte Gestaltung des NC-Programms gar nicht erst auftreten zu lassen. Wie sich die Verfahren der Potenzialanalyse und der Reduktion technischer Nebenzeiten in das Fertigungssystem integrieren lassen, wird im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

6 Integration in das Fertigungssystem

Auch die Integration der zuvor behandelten Analyse- und Optimierungsverfahren in das Fertigungssystem stellt einen wichtigen Schritt für eine erfolgreiche Anwendung der Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten dar. Jedoch unterscheiden sich die Voraussetzungen wie auch die Anforderungen zur Integration von denen der Prozessplanung. Während der Fokus einer Prozessplanung auf einer möglichst frühzeitigen Optimierung oder einer von vorn herein optimalen Gestaltung der NC-Programme und der Steuerungsparametrierung liegt, ist es das Ziel einer Integration in das Fertigungssystem, die in den Fertigungsprozess integrierten Optimierungsverfahren verstehen, anwenden und anpassen zu können.

Gerade durch viele Konstruktionsänderungen oder Werkzeuganpassungen erfahren die NC-Programme immer wieder Veränderungen, welche auch die eingebrachten Optimierungsverfahren beeinflussen. Weiterhin müssen vielfach Fertigungsprozesse eigenständig optimiert werden, welche die Prozessplanungsphase ohne die Prämisse minimaler technischer Nebenzeiten durchlaufen haben. Hierzu ist es erforderlich, dass neben den Optimierungsverfahren auch Potenzialanalyseverfahren in das Fertigungssystem integriert werden. Dies kann durch Integration in die CNC oder die Leit- und Überwachungssysteme geschehen. Im Gegensatz zu den oftmals sehr leistungsstarken Konstruktions- beziehungsweise Simulationscomputern der Prozessplanung stehen im Fertigungssystem aber zumeist nur einfache Computersysteme zur Verfügung. Außerdem ist darauf zu achten, die Beeinflussung des Fertigungsprozesses möglichst gering zu halten. Dies ist im Wesentlichen durch eine schnelle und einfache Anwendbarkeit der Verfahren zu erzielen. Diesen Voraussetzungen muss bei der Entwicklung von Software Rechnung getragen werden. Für eine Integration in das Fertigungssystem konnten fünf differente Wege identifiziert werden:

- Ähnlich wie bei der Integration in die Prozessplanung könnten dem Anwender Anleitungen und Kurzinformationen bereitgestellt werden. Diese ließen sich gegebenenfalls auch in das Hilfesystem der CNC integrieren.
- Einige Verfahren könnten als Zyklen umgesetzt und der Standardbibliothek von CNCs hinzugefügt werden (vgl. Siemens 2013, S. 154ff).

-
- Die Entwicklung eigener HMI-Masken und -Darstellungen würde es ermöglichen, den Anwender durch die Optimierungsverfahren zu führen und ihm kontextsensitiv Hilfe zur Verfügung zu stellen.
 - Weiterhin wäre die Entwicklung eines neuen Moduls der Prozessbeobachtung denkbar, welches als Webservice an Personal Computern abgerufen werden könnte.
 - Zuletzt kann auch die Schulung und Unterstützung von Experten in Betracht gezogen werden, welche eigene Optimierungsprojekte und Änderungen durchführen sollen.

Bei einem Großteil der CNCs ist es möglich, eigene Anleitungen und Hilfen in die allgemeine Hilfedatei zu integrieren (vgl. Siemens 2013b, S. 425ff). So könnte dem Anwender kontextsensitive Unterstützung angeboten werden, welche an jeder CNC des Fertigungssystems elektronisch verfügbar ist. Jedoch ist abzusehen, dass sich solche Hilfestellungen keiner großen Beliebtheit erfreuen werden. Denn oftmals hat der Anwender im Fertigungssystem nicht die Zeit, sich in komplexe Sachverhalte einzulesen. Verfahren, welche in den Anleitungen beschrieben wären, würden dadurch kaum angewandt.

Dem gegenüber steht die Entwicklung eigener Zyklen für die CNC. Neben den in Kapitel 3.3 behandelten „Protokollierzyklen“ zur Potenzialanalyse können durch Zyklen auch Optimierungsverfahren abgebildet werden. Dies gilt insbesondere für die Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen, welche sich sehr gut in einen Zyklus umsetzen lässt. So werden die NC-Befehle zur Erzeugung der Werkzeugbahn Zyklen gekapselt, welche durch Übergabeparameter anpassbar sind (vgl. Siemens 2013a, S. 158; Bosch Rexroth 2010c, S. 52). Dadurch wird die Anwendung wesentlich einfacher, da für eine Anpassung der Werkzeugbahn nur einzelne Parameter geändert werden müssen. Komplexe Befehlskonstrukte und Berechnungen bleiben dem Anwender im NC-Bearbeitungsprogramm verborgen. Diese Zyklen müssten aber aufgrund der sehr differierenden Sprachsyntax auf CNCs verschiedener Hersteller immer mehrfach entwickelt werden (vgl. Kapitel 2.2.4).

An die Entwicklung eigener Zyklen knüpft auch die Projektierung eigener Masken für das Human Machine Interface (HMI) an. Ähnlich wie bei der Erstellung von Hilfemasken erlauben es viele CNCs, eigene Masken und Menüs anzulegen (vgl. Siemens 2013b, S. 635ff). So ist es möglich, einzelne NC-Befehle oder ganze Abfolgen und Zyklen automatisiert zu erstellen. Hierfür muss der Anwender nur seine individuellen Anforderungen und Parameter in Eingabemasken eingeben. Diese Masken können mit Eingabehilfen und Bildern versehen werden, um dem Anwender eine wesentliche Unterstützung zu geben. Auch können durch Plausibilitätsabfragen und Grenzwerte Fehleingaben weitestgehend vermieden werden.

Neben den CNCs stehen für eine Integration in das Fertigungssystem auch Prozessbeobachtungssysteme zur Verfügung. Durch diese Systeme wird schon eine Vielzahl an Daten aus den Fertigungsprozessen gewonnen. Hier könnte eine Erweiterung dieser Funktionalität

ansetzen, um die Anwendung von Potenzialanalyse- und Optimierungsverfahren weiter zu vereinfachen. Die Fertigungsüberwachungssysteme werden zumeist zentral betrieben und die im Fertigungssystem zur Verfügung stehenden Personal Computer besitzen meist nicht die Rechenleistung, um eigenständige Fertigungsüberwachungssysteme zu betreiben. Deshalb kann sich hier die Entwicklung eines Webservices anbieten. Im Wesentlichen sind alle Personal Computer und CNCs im Fertigungssystem in der automobilen Großserienfertigung mit dem Firmennetz verbunden. Eine Potenzialanalyse an einer Werkzeugmaschine könnte so von einem Personal Computer per Webservice ausgelöst und von einem zentralen Server ausgeführt werden (vgl. Kapitel 3.1.4). Eine Anpassung oder Optimierung von NC-Programmen wäre zwar auch über einen Webservice denkbar, jedoch ist solch eine Funktionalität bedingt durch allgemeine Sicherheitsanforderungen ausgeschlossen.

Zuletzt ist eine der wichtigsten Möglichkeiten der Integration in das Fertigungssystem immer die Schulung und Unterstützung von Experten, welche mit den Analysen und Optimierungen zur Reduktion technischer Nebenzeiten beauftragt werden. Die Vielzahl verschiedenster Fertigungsprozesse wird es dem Anwender nur selten erlauben, eine universelle Vorgehensweise bei der Reduktion technischer Nebenzeiten anzuwenden. Sonderfälle können mit Hilfe von Experten im Fertigungssystem betrachtet und gegebenenfalls in den allgemeinen Verfahrensablauf integriert werden.

6.1 Umsetzung der Integration

Eine exemplarische Umsetzung einer Integration der Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten in das Fertigungssystem wurde anhand zweier Beispiele durchgeführt. Einerseits wurde ein Potenzialanalyseverfahren als zusätzliches Modul in ein vorhandenes Prozessüberwachungssystem integriert. Die neue Funktion kann über einen Webservice an jedem Personal Computer über das Intranet abgerufen werden. Andererseits wurde als zweites Beispiel ein Optimierungsverfahren als Kombination zweier zuvor beschriebener Wege der Integration umgesetzt: Die Entwicklung von Anwenderzyklen zur Programmierung einer schnelleren Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen und die benutzerführende Parametrierung dieser Zyklen durch eigene HMI-Masken.

6.1.1 Beispiel 1: Potenzialanalyse mit Hilfe eines Webservice

Das erste Beispiel zeigt, wie eine Potenzialanalyse im Fertigungssystem für den Anwender einfach nutzbar gemacht werden kann. Hierzu wurde ein zusätzliches Programmmodul in ein bestehendes Prozessüberwachungssystem integriert. Dieses Prozessüberwachungssys-

tem wird zentral auf einem Server betrieben und kann über einen Webservice dezentral von jedem Personal Computer über das Intranet genutzt und angepasst werden. Das neu geschaffene Modul knüpft dabei an einem Vorläufersystem an, wurde aber anhand gewonnener Erfahrungen und aufgrund des allgemeinen technischen Fortschritts neu entwickelt. Ziel bei der Entwicklung des Moduls mit dem Namen „NCTAexpress“ (NC-Taktzeitanalyse) war, die Nutzung für den Anwender möglichst einfach zu gestalten und die notwendigen Eingaben des Nutzers auf ein Minimum zu reduzieren. Das Modul nutzt hierzu das in Kapitel 3.1.4 beschriebene Verfahren des Fernzugriffs via OPC-Schnittstelle.

Eine Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten beginnt dabei immer mit dem Aufruf des Webservices in einem Internetbrowser. Nach erfolgter Anmeldung im Prozessüberwachungssystem kann der Anwender das gewünschte Modul auswählen und bekommt eine Übersicht der für ihn sichtbaren Maschinen im Unternehmensnetzwerk. Neue oder noch fehlende Maschinen können mit Hilfe ihrer IP-Adresse und ihrem Aufstellungsort in der Baumstruktur ergänzt werden (1 in Abbildung 6.1). Hat der Anwender die gewünschte Maschine ausgewählt, kann er mit der Datenerfassung beginnen. Sollte die Maschine ausgeschaltet oder im Netzwerk nicht verfügbar sein, erhält er eine entsprechende Meldung und eine Anleitung zur Behebung möglicher Ursachen.

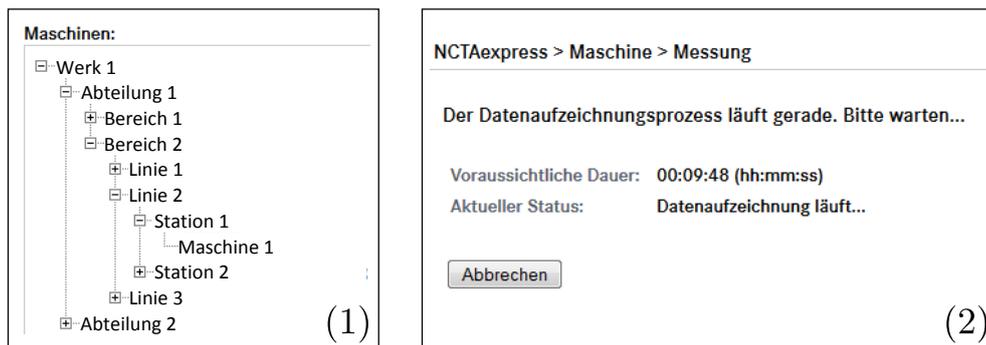


Abbildung 6.1: NCTAexpress - Maschinenbaum und laufende Messung

Zu Beginn einer Messung muss der Anwender eine gewünschte Messdauer und die aufzuzeichnenden NC-Kanäle auf der CNC auswählen. Auf die Anzahl und die Art der aufzuzeichnenden Variablen hat der Anwender aber keinen Einfluss. Es handelt sich dabei um eine feste Liste, welche für eine nachfolgende, korrekte Auswertung zwingend notwendig ist. Sie enthält unter anderem die Stringvariable des aktuell gültigen NC-Satzes und des ausgeführten NC-Programms. Während der Datenerfassung steht die CNC für weitere Aktionen über den Webservice nicht zur Verfügung. Ein Countdown weist auf das Ende der Aufzeichnung hin (2 in Abbildung 6.1).

Nachdem die Aufzeichnung abgeschlossen wurde, erfolgt die Bereitstellung des Messprotokolls. Hierbei handelt es sich aber um eine für den Anwender nicht sinnvoll auswertbare

Datei, da darin nur die aufgezeichneten Variablen mit einem Zeitstempel aufgelistet sind. Um zu hebende Potenziale aufzuzeigen, folgt daher eine automatisierte Auswertung des Messprotokolls. Diese muss der Anwender über den Webservice anstoßen, da vor Beginn der Auswertung noch das NC-Hauptprogramm und das Werkzeugwechselprogramm kenntlich gemacht werden müssen. Dies ist notwendig, da aufgrund verschiedener zu fertigender Bauteile und unterschiedlicher Maschinenhersteller die Namen der NC-Programme oftmals nicht eindeutig sind. Außerdem kann der Anwender entscheiden, ob unvollständig aufgezeichnete Fertigungstakte zu Beginn und am Ende der Aufzeichnung für die Auswertung entfernt werden sollen (3 in Abbildung 6.2). Die Auswertung wird nun zentral auf einem leistungsstarken Unternehmensserver ausgeführt.

Nach erfolgreicher Auswertung wird dem Anwender sowohl das ursprüngliche Messprotokoll als auch die abgeschlossene Auswertung als Download bereitgestellt (4 in Abbildung 6.2). Die Auswertung wird in Form einer Microsoft Excel Datei zur Verfügung gestellt - einem Format, welches im Allgemeinen auf Personal Computern lesbar ist. In der Auswertungsdatei finden sich drei Blätter, welche mit ihrem Aufbau der in Kapitel 3.1.5 beschriebenen Darstellungsform in drei Detaillierungsgraden folgen. Die Auswertung wird dabei über den gesamten Erfassungszeitraum und damit gegebenenfalls über mehrere Takte und auch Stunden hinweg durchgeführt. Dies bietet den großen Vorteil, Schwankungen der Taktzeit identifizieren und bewerten zu können. Der Anwender kann so auf einfachem und übersichtlichem Weg den Fertigungsprozess auf zu hebende Potenziale untersuchen.

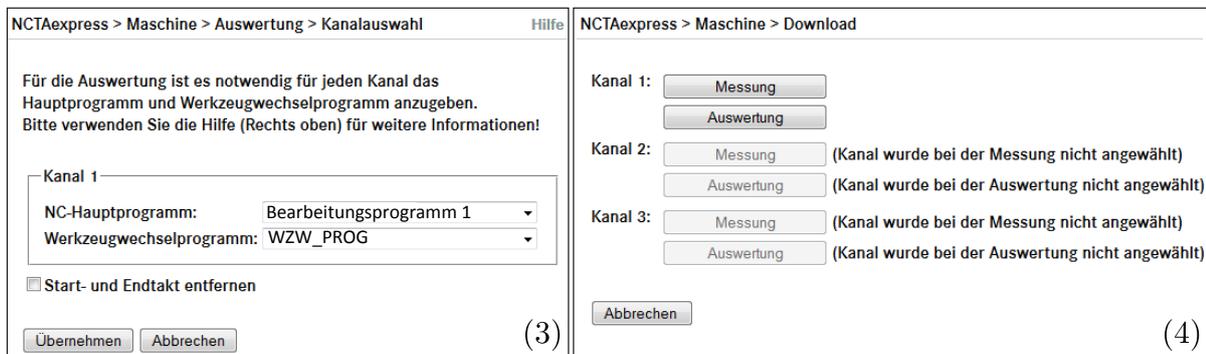


Abbildung 6.2: NCTAexpress - Abfrage des Hauptprogramms und Werkzeugwechsels; Maske zum Download der Messung und Auswertung

6.1.2 Beispiel 2: Anwenderzyklen mit erweiterter HMI-Darstellung

Das zweite Beispiel zeigt eine Kombination aus einer Integration in das Fertigungssystem durch NC-Zyklen und Masken für das Human Machine Interface der CNC. Zuerst wurde das

in Kapitel 4.2.5 beschriebene Verfahren zur Werkzeugbahnerzeugung in eigene Zyklen für eine Siemens Sinumerik 840D Operate umgesetzt. Da für die Programmierung der Werkzeugbahn inklusive aller Abfragen und Berechnungen mehrere hundert NC-Programmsätze notwendig sind, war es für eine sinnvolle Implementierung in das NC-Bearbeitungsprogramm unumgänglich, diese in einen Zyklus zu kapseln. Da aber für jede neue Werkzeugbahn nicht jedes Mal ein neues, individuelles NC-Programm verwendet werden sollte, wurde darauf geachtet, universell einsetzbare Zyklen zu entwickeln. Hierbei erwies sich die Möglichkeit, Parameter zwischen NC-Programmen zu übergeben, als eine wertvolle Programmierweise (vgl. Siemens 2013a, S. 158ff). Letztlich erfolgte die Umsetzung des Verfahrens der „limitierten, unbestimmten Werkzeugbahn“ in Form von fünf unterschiedlichen Zyklen, um möglichst viele Formen der Werkzeugbahn beschreiben zu können - ohne dabei den Programmieraufwand für den Anwender extrem steigen zu lassen:

- Der erste Zyklus bietet die Möglichkeit, Werkzeugbahnen zwischen zwei Bearbeitungsstellen, welche sich in der gleichen Ebene befinden, zu programmieren. Hierzu sind an den Zyklus drei Parameter zu übergeben.
- Der zweite Zyklus stellt eine Erweiterung des ersten dar. Mit ihm werden Werkzeugbahnen zwischen zwei Bearbeitungsstellen programmiert, allerdings kann zwischen Start- und Zielpunkt eine Störgeometrie und/ oder ein Sprung in eine höher oder tiefer liegende Ebene vorgegeben werden. Um eine individuelle Werkzeugbahn vollständig beschreiben zu können, sind hier 14 Parameter notwendig.
- Während die ersten beiden Zyklen Werkzeugbahnen ohne eine Rotation um die A- oder B-Achse beschreiben, kann mit dem dritten Zyklus eine Werkzeugbahn beschrieben werden, welche bis zu fünf Achsen nutzt, um eine Störgeometrie zu umfahren. Der Schutz vor einer Kollision wird durch die Benennung eines Störkreises garantiert. Insgesamt müssen hier sieben Parameter programmiert werden.
- Ergänzend wurden zwei weitere Zyklen entwickelt, mit welchen die Bewegung von der Werkzeugwechselposition weg beziehungsweise zu ihr hin programmiert werden kann. Hierbei sind neun respektive zehn Parameter an den Zyklus zu übergeben.

Die entwickelten Zyklen wurden dazu genutzt, NC-Bearbeitungsprogramme der Großserienfertigung anzupassen. Hierzu wurden die „konventionell“ programmierten Eilgangbewegungen durch die zuvor genannten universellen Zyklen ersetzt (vgl. Abbildung 6.3). Zur Differenzierung wurden diese unterschiedlich parametrisiert. Auf den ersten Blick führte dies zu einer positiv zu sehenden Verkürzung der Satzzahl im NC-Bearbeitungsprogramm, da zumeist eine Abfolge von drei Eilgangsätzen durch einen Zyklus ersetzt wurde. Da der Anwender den Inhalt der Zyklen nicht anpassen muss, besitzt die große Anzahl an NC-Sätzen innerhalb des Zyklus keine Relevanz. Trotzdem erwies sich solch eine Zyklenprogrammierung

rung auch als nachteilig. Durch die Vielzahl an zu programmierenden Parametern - bei Werkzeugbahnen mit Störgeometrie sind es 14 - ist es schwierig, die Zyklen korrekt zu parametrieren. Insbesondere steigt dadurch die Fehleranfälligkeit in der Programmierung enorm, da eine unbeabsichtigte Parametrierung in falscher Reihenfolge schnell zu einer Kollision in der Werkzeugmaschine führen kann.

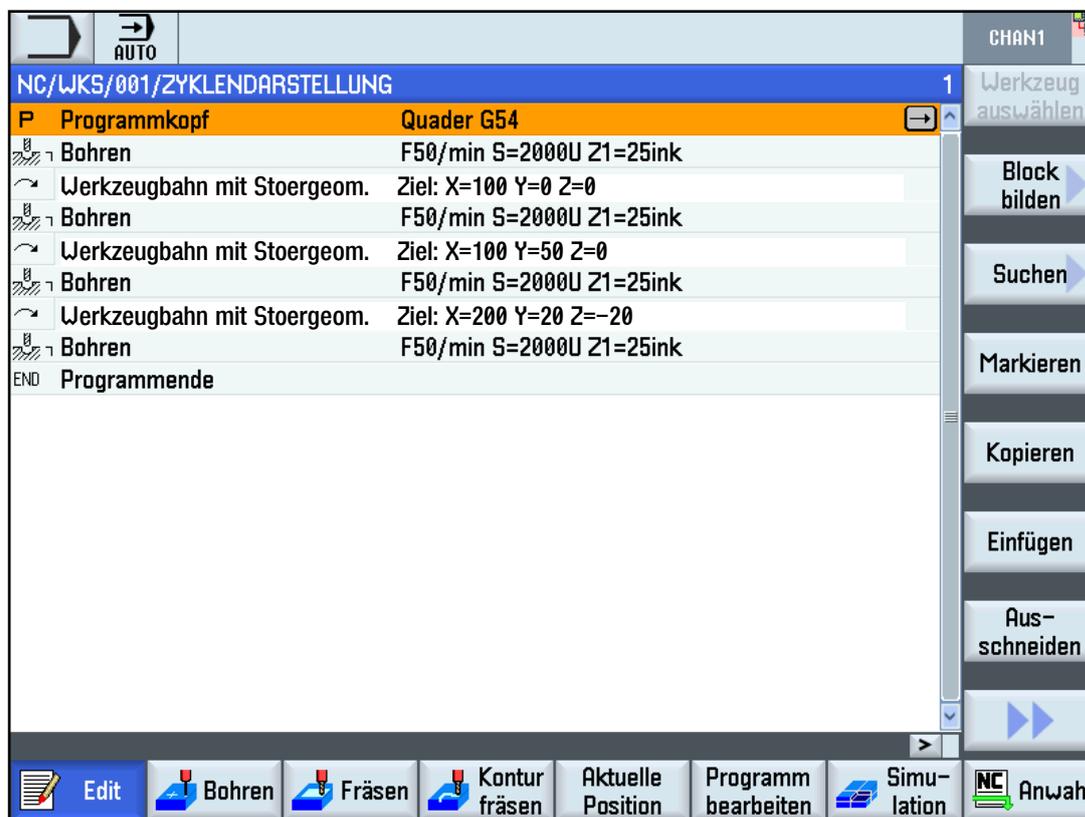


Abbildung 6.3: Erweiterte HMI-Darstellung - Darstellung im Bearbeitungsprogramm

Um den Nachteil der schwierigen und fehleranfälligen Programmierung zu kompensieren, wird auf eine weitere Möglichkeit der anwenderseitigen Individualisierung der CNC zurückgegriffen: die Projektierung von eigenen HMI-Masken. Viele der Steuerungshersteller bieten die Möglichkeit der Maskenprojektierung, um spezielle Wünsche des Maschinenherstellers oder Anwenders erfüllen zu können (vgl. Fanuc 2010b, S. 19). Eine spezielle Form der Anpassung stellt das Softwarepaket „Sinumerik Integrate Run MyScreens“ der Siemens AG dar (vgl. Siemens 2013b). Mit dieser Steuerungsfunktion ist es möglich, eigene HMI-Masken mit eigenen Zyklen zu verknüpfen und so die Parametrierung von Zyklen wesentlich zu vereinfachen. So sind für die Zyklen zur Programmierung der Werkzeugbahn auch eigene HMI-Masken projektiert. Da nicht zwingend zu jedem Zyklus eine eigene Maske angelegt werden muss, wurde darauf geachtet, mehrere Zyklen möglichst übersichtlich in einer gemeinsamen Maske zusammenzufassen. Als Resultat stehen dem Anwender nun drei Masken zur Verfügung.

Mit Hilfe der ersten Maske können Bewegungen zwischen zwei Bearbeitungsstellen beschrieben werden (Abbildung 6.4). Dazwischen kann sich eine Störgeometrie oder ein Sprung in eine andere Bearbeitungsebene befinden. Die zweite Maske ist für die Parametrierung des Zyklus mit Rotationsachsen vorgesehen. Das Anfahren zu und Abfahren von der Werkzeugwechselposition ist in einer dritten Maske zusammengefasst. Mit Hilfe einfacher Darstellungen und Hinweistexten werden die einzelnen einzugebenden Parameter erklärt. Innerhalb der Maskenprojektierung wurden auch diverse Sicherheits- und Plausibilitätsabfragen integriert, um so Fehleingaben durch den Anwender auszuschließen. Die mit den HMI-Masken verknüpften Zyklen müssen damit nicht mehr über eine reine Tastatureingabe in das NC-Bearbeitungsprogramm eingefügt werden, sondern können über ein frei konfigurierbares Menü angewählt und parametrierbar werden.

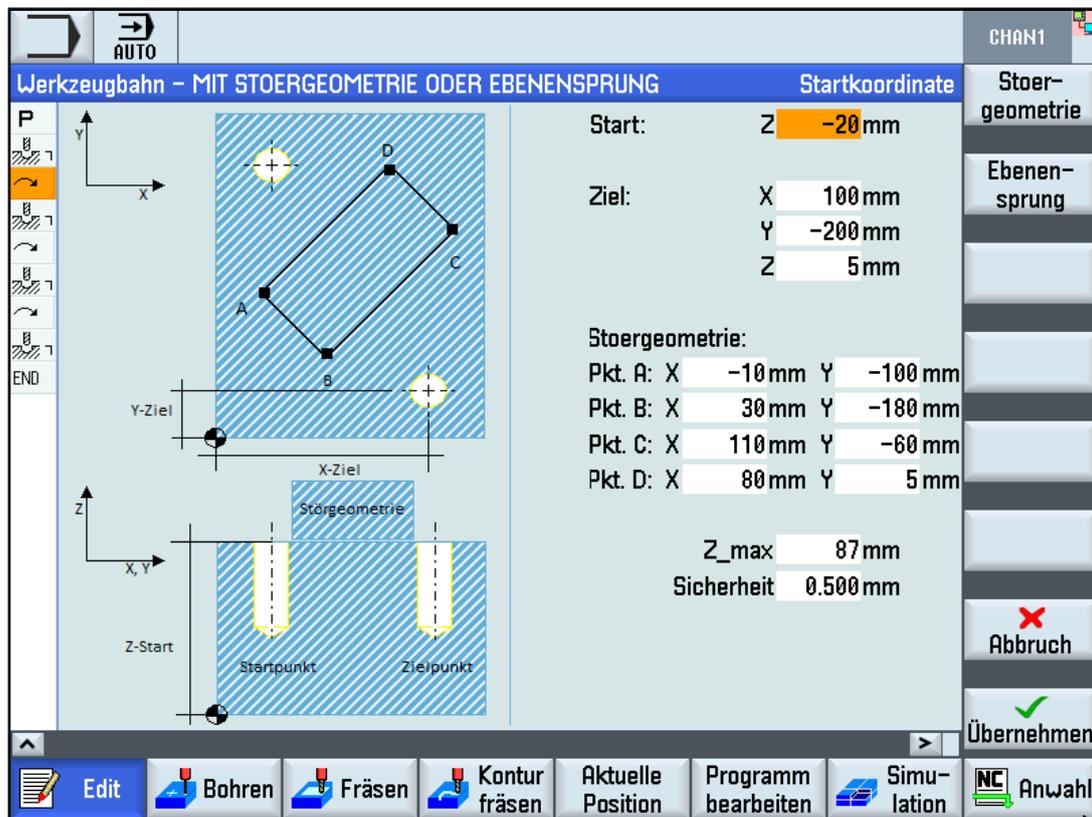


Abbildung 6.4: Erweiterte HMI-Darstellung - Eingabemaske Zyklen

Einen eminent wichtigen Vorteil stellt dabei die Möglichkeit dar, von einem parametrieren Zyklus in eine befüllte Maske zu wechseln. Egal, ob der Zyklus zuvor mit einer eigenen HMI-Maske erstellt oder durch manuelle Eingabe eingefügt worden ist. Dies erleichtert die Anpassung von komplexen Zyklen innerhalb des Fertigungssystems enorm. Der Anwender kann so ohne Kenntnis der Funktion und Parametrierung des Zyklus Anpassungen sicher vornehmen, um auf Änderungen im Fertigungsprozess zu reagieren.

6.2 Fazit

Die beiden Beispiele haben gezeigt, dass eine Integration in das Fertigungssystem sehr gut möglich ist. Im ersten Beispiel wurde beschrieben, wie durch die Nutzung eines Webservice aufwendige Auswertungen auch indirekt an Personal Computern durchgeführt werden können. Mittels des Webservice ist es möglich, eine Erfassung technischer Haupt- und Nebenzeiten über einen Fernzugriff auf der CNC anzustoßen. Nach erfolgter Aufzeichnung der Daten wird die rechenintensive Auswertung zentral auf einem Unternehmensserver durchgeführt. Mit der Erweiterung der HMI-Masken konnte die hohe Anwendungshürde von Anwenderzyklen zur Optimierung der Werkzeugbahn deutlich gesenkt werden. Die Anwendung des in Kapitel 4.2.5 vorgestellten Verfahrens zur Programmierung einer schnelleren Werkzeugbahn konnte so erheblich vereinfacht werden. Zusätzlich wurden durch Plausibilitätsabfragen mögliche Fehleingaben unterbunden.

Die exemplarische Umsetzung jeweils eines Verfahrens zur Potenzialanalyse und Optimierung technischer Nebenzeiten zeigt, dass sich viele der zuvor beschriebenen Verfahren zur Umsetzung in das Fertigungssystem eignen können. Eine weiterführende Integration würde dazu beitragen, die Akzeptanz von Verfahren zur Potenzialanalyse und Optimierung technischer Nebenzeiten im Fertigungssystem zu steigern und die Anwendungsschwelle deutlich zu senken. Die in diesem und dem vorhergehenden Kapitel vorgestellten Integrationsmöglichkeiten wurden unterstützend genutzt, um drei exemplarisch ausgewählte Fertigungsprozesse zu analysieren und optimieren. Diese Validierung der Analyse- und Optimierungsverfahren wird im nachfolgenden Kapitel behandelt.

7 Validierung und Ergebnisse

Die Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten, wie sie in Kapitel 4 behandelt wurde, soll neben der dazugehörigen Potenzialanalyse und vorgestellter Integrationsmöglichkeiten in das Fertigungssystem und die Prozessplanung validiert werden. Hierzu erfolgt eine Validierung an drei Beispielen der Großserienfertigung automobiler AntriebsstrangkompONENTEN: dem Schieber- und Ventilgehäuse eines Automatikgetriebes sowie dem Zylinderkopf und Kurbelgehäuse eines Verbrennungsmotors. Daran anknüpfend werden die Ergebnisse aus der entwickelten Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten behandelt.

7.1 Validierung

Zur Validierung der Methode wurden drei exemplarische Prozesse der Großserienfertigung ausgewählt: Bei der Fertigung des Schieber- und Ventilgehäuses handelt es sich um einen in Betrieb befindlichen Prozess, welcher auf Grund einer gewünschten Ausbringungssteigerung der Fertigungslinie angepasst werden sollte. Das zweite Beispiel beschreibt die Abschätzung der Optimierbarkeit eines Fertigungsprozesses zur Herstellung eines Kurbelgehäuses während seiner Inbetriebnahme. Die NC-Programme wurden als Teil des gesamten Fertigungsprozesses vom Werkzeugmaschinenhersteller mitgeliefert. An ihnen wurde untersucht, ob teilweise auf die Neuanschaffung weiterer Werkzeugmaschinen bei einer künftigen Erweiterung der Fertigungslinie verzichtet werden kann. Im dritten Beispiel, der Fertigung eines Zylinderkopfs, wurde schon bei der Programmerstellung darauf geachtet, technische Nebenzeiten zu minimieren. Da die NC-Programme vom Prozesseigner größtenteils selbst entwickelt wurden, konnte schon vor der Inbetriebnahme des Fertigungsprozesses ein Großteil der Optimierungen eingepflegt werden. Eine Einordnung der drei Beispiele im Entstehungsprozess eines NC-Programms kann Abbildung 7.1 entnommen werden.



Abbildung 7.1: Einordnung der Beispiele im Entstehungsprozess eines NC-Programms

7.1.1 Beispiel 1: Schieber- und Ventilgehäuse

Dieses Beispiel stellt einen typischen Fall der reaktiven Optimierung einer „Engpassmaschine“ dar. Eine gewünschte Produktionssteigerung der Schieber- und Ventilgehäuse für ein Automatikgetriebe sollte durch eine Verringerung des Linientaktes erreicht werden. Anhand vorangegangener Taktzeitanalysen konnte festgestellt werden, dass eine Absenkung des Linientaktes auf das Zielmaß durch die Optimierung einer einzelnen Werkzeugmaschine erreicht werden konnte - sie stellte den Engpass in der Fertigungslinie dar. Um diesen Engpass zu beseitigen, wurde eine Verringerung der Taktzeit an der Werkzeugmaschine von sechs Prozent gefordert. Alternativ hätte bei Nichterreichen des Optimierungsziels eine neue Werkzeugmaschine angeschafft werden müssen.

Eine erste Potenzialanalyse erfolgte durch eine visuelle Beobachtung mittels einer „Actionkamera“ im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine (vgl. Kapitel 3.1.1). Eine zufriedenstellende Beobachtung konnte aber nicht erreicht werden, da aufgrund des komplexen Spannsystems mit Ober- und Unterplatte und eines sehr beengten Arbeitsraums nicht der gesamte Fertigungsprozess aufgezeichnet werden konnte. Auch eine visuelle Beobachtung von außen war auf Grund der Bauform der Werkzeugmaschine und das Fehlen von Fenstern ausgeschlossen. Trotzdem konnten durch diese erste Analyse schon Potenziale im Fertigungsprozess erkannt werden. So waren durch die Videoaufnahme einzelne lange Wartezeiten und große Sicherheitsabstände zwischen Werkstück und Werkzeug zu erkennen.

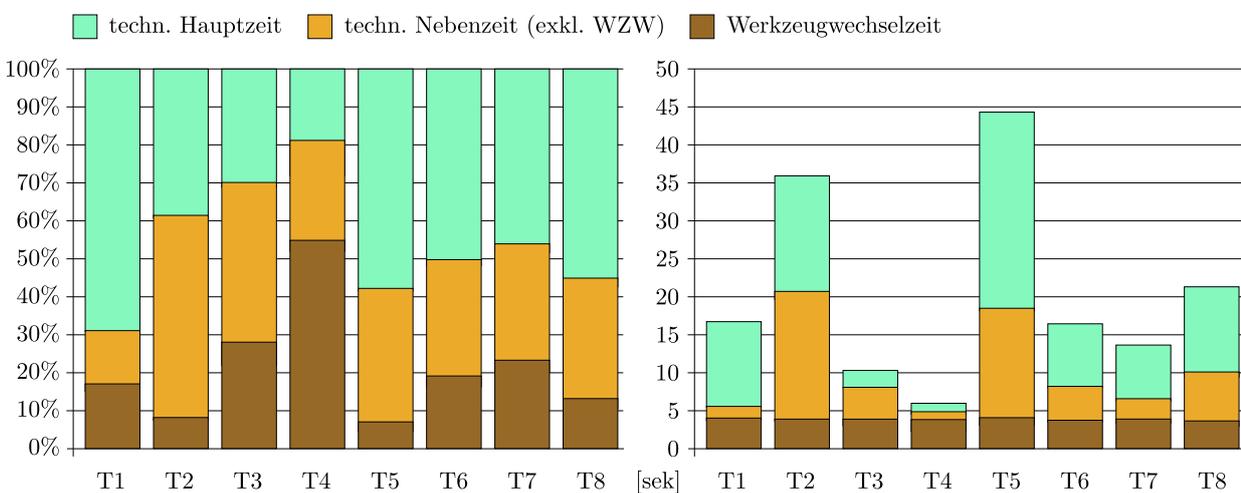


Abbildung 7.2: Zeitanteile des Fertigungsprozesses je Werkzeug anhand einer visuellen Beobachtung (vgl. Abbildung 3.6)

An die erste Potenzialanalyse anknüpfend wurde eine weitere Analyse anhand des NC-Programmarchivs durchgeführt. Hier konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden. So wurden für die zuvor schon erkannten Wartezeiten und großen Sicherheitsabstände eindeutig durch das NC-Bearbeitungsprogramm verursacht. Aber auch weitere Optimierungspo-

tenziale konnten so erkannt werden. Durch die Vielzahl an zu fertigenden Bohrungen bot sich auch eine Optimierung der Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs (kurz Bearbeitungsreihenfolge) an. Des weiteren bestand die Möglichkeit, eine Vielzahl von Verfahrenbewegungen mit einem alternativen Verfahren zu ersetzen. Darüber hinaus konnten auch Potenziale in der Parametrierung der Systemtakte erkannt werden, da die CNC-Systemauslastung in ihrem Maximum vierzig Prozent nicht überschritt.

Die Hebung der zuvor erkannten Potenziale erfolgte allein durch die Anpassung des NC-Bearbeitungsprogramms. Eine Veränderung der Systemtakte wurde zurückgestellt, da sonst eine neue Sicherheitsabnahme hätte erfolgen müssen. Eine CNC-Bearbeitungssimulation stand bei dieser Werkzeugmaschine nicht zur Verfügung. Die programmierten Wartezeiten konnten nach Rücksprache mit den Maschinenführern als für den Fertigungsprozess nicht notwendig eingestuft und aus dem NC-Programm entfernt werden (vgl. T7 in Tabelle 7.1). Die programmierten Sicherheitsabstände wurden vielfach um mehrere Millimeter auf das in Kapitel 4.1 vorgeschlagene Maß - entsprechend des Bearbeitungsstandes der Werkstückoberfläche - reduziert (vgl. T4). Für die durch den „Potenzialanalysator“ in den Fokus gerückten Bearbeitungsreihenfolgen einzelner Werkzeuge (vgl. T2) erfolgte eine Optimierung mit Hilfe des Computerprogramms „BESTWAY“ (vgl. Abbildung 5.4). Die Werkzeugbahn wurde mittels des in Kapitel 4.2.5 vorgestellten Verfahrens der limitierten, unbestimmten Bahn angepasst. Insbesondere konnte damit das Werkzeug T7 optimiert werden.

Tabelle 7.1: Erzielte Ergebnisse in Bezug auf die Gesamttaktzeit an einer Werkzeugmaschine zur Fertigung von Schieber- und Ventilgehäusen

Werkzeug	Fertigungsverfahren	Werkzeugbahn: limitierte, unbestimmte Bahn	Bearbeitungs- reihenfolge	Sicherheits- abstand	Wartemarken, Parallelisierung	Gesamtergebnis je Werkzeug
T1	Scheibenfräsen	-0,0%	-0,6%	-2,3%	-0,0%	-2,9%
T2	Bohren	-8,7%	-1,7%	-1,7%	-0,0%	-12,1%
T3	Bohren	-7,8%	-0,0%	-1,0%	-0,0%	-8,7%
T4	Bohren	-0,0%	-0,0%	-3,6%	-3,7%	-7,3%
T5	Gewindeformen	-0,0%	-1,4%	-1,6%	-4,5%	-7,5%
T6	Bohren	-8,2%	-1,3%	-1,9%	-0,0%	-11,4%
T7	Bohren	-9,4%	-0,0%	-1,6%	-7,0%	-18,9%
T8	Bohren	-7,4%	-0,9%	-1,4%	-0,9%	-10,6%
Gesamt		-4,4%	-0,9%	-1,5%	-1,9%	-8,7%

Nach der Anpassung des NC-Programms wurde dieses wieder auf die CNC der Werkzeugmaschine aufgespielt und eingefahren. Nach erneuter Messung der Taktzeit konnte

eine Reduktion von 8,7 Prozent ermittelt werden (vgl. Tabelle 7.1, inkl. Be-/Entladung des Werkstücks). Der Zugriff auf zuvor zurückgestellte Verfahren musste somit nicht mehr erfolgen.

Die durch die Reduktion technischer Nebenzeiten erreichte Taktzeit der Werkzeugmaschine reichte aus, um den Engpass in der Fertigungslinie zu beseitigen. Die gewünschte Produktionssteigerung wurde erreicht und eine zusätzliche Maschineninvestition so vermieden.

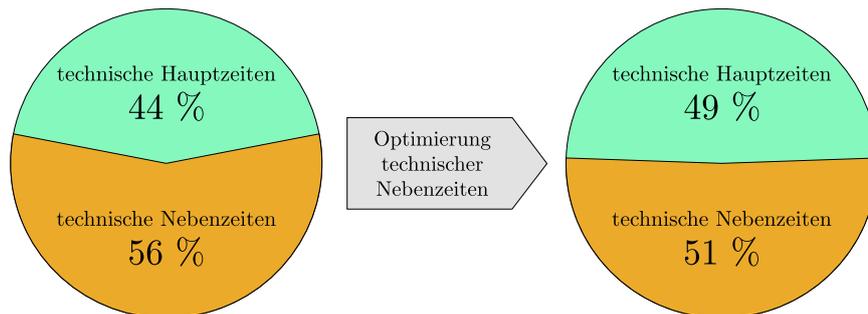


Abbildung 7.3: Anteile technischer Haupt- und Nebenzeiten vor und nach der Optimierung

7.1.2 Beispiel 2: Kurbelgehäuse

Im Gegensatz zum ersten Beispiel, welches eine reaktive Optimierung während der Betriebsphase beschreibt, behandeln die Beispiele 2 und 3 die Reduktion technischer Nebenzeiten vor beziehungsweise während der Inbetriebnahme des Fertigungssystems. In diesem Beispiel wird die Fertigung eines Kurbelgehäuses beschrieben. Dabei wurden neben den Werkzeugmaschinen inklusive Verkettung auch die Fertigungsprozesse und NC-Programme vom Maschinenhersteller entwickelt und geliefert. Das Fertigungssystem war so ausgelegt, dass es die gewünschte Ausbringung in der geforderten Qualität erreichen kann. Trotzdem war es das Ziel des Prozesseigners, Optimierungspotenziale schon während der Inbetriebnahme zu erkennen, um so den Bedarf zusätzlicher Maschinen für künftige Erweiterungen der Linie abschätzen zu können.

Exemplarisch wurde für dieses Anwendungsbeispiel eine Werkzeugmaschine in der Fertigungslinie ausgewählt. Da vor und während der Inbetriebnahme des Fertigungssystems noch keine dem Serienprozess entsprechende Fertigung betrieben werden konnte, war eine Potenzialanalyse durch Prozessbeobachtung ausgeschlossen. Deshalb konnten Potenziale einzig durch die Analyse des NC-Programmarchivs erfolgen. Der Maschinenhersteller war bei der Erstellung seiner NC-Programme weitgehend frei, einzig eine grobe Programmstruktur und die einheitliche Benennung von Variablen war durch das Lastenheft vorgeschrieben. Wie schon in Kapitel 2.4.2 beschrieben, liegt das Interesse des Maschinenherstellers in der

Erreichung seiner im Auftrag vereinbarten Ziele, wie Ausbringung und Qualität. Um den aus der geforderten Ausbringung und der Anzahl an Maschinen resultierenden Linientakt zu erreichen, setzt auch der Maschinenhersteller verschiedene Verfahren zur Reduktion technischer Nebenzeiten ein. Jedoch nur solange, wie er noch über der anvisierten Taktzeit liegt. Weitere Potenziale technischer Nebenzeiten werden zumeist nicht mehr gehoben.

Eine Analyse mit Hilfe des Computerprogramms „Potenzialanalysator“ ergab eine Vielzahl verschiedener Potenziale. Anhand der Steuerungsparametrierungsdatei konnten folgende erkannt werden:

- Die Werkzeugmaschine weist gegenüber den anderen Achsen eine bedeutend dynamischere Y-Achse auf (vgl. Tabelle 4.4). Eine Betrachtung der Bearbeitungsreihenfolge einzelner Werkzeuge bietet sich damit an. Auf Grund dieser speziellen Maschinendynamik empfiehlt sich das Verfahren der „Vorzugsrichtung“. In dem meisten Fällen handelt es sich bei der Bearbeitung des Kurbelgehäuses um triviale Reihenfolgen mit oftmals symmetrischer Verteilung (vgl. Abbildung 4.10). Eine Optimierung mit Hilfe der Software „BESTWAY“ wird demnach keinen entscheidenden Vorteil gegenüber dem Verfahren der Vorzugsrichtung besitzen.

Die Analyse des NC-Bearbeitungsprogramms und der darin verwendeten Unterprogramme und Zyklen weist weitere Potenziale aus:

- Da sämtliche Werkzeugbahnen als Geradeninterpolation mit Genauhalt ausgeführt werden, bietet sich eine Alternative durch die in Kapitel 4.3 beschriebenen Verfahren an. So könnte durch den Einsatz des Verfahrens der „limitierten, unbestimmten Werkzeugbahnen“ schnell ein größeres Potenzial gehoben werden. Die Werkzeugbahnen durch einen Genetischen Algorithmus zu bestimmen, ist durch den Zeitpunkt der Optimierung nicht mehr möglich. Der für den Genetischen Algorithmus notwendige zusätzliche Inbetriebnahmeaufwand kann in den Inbetriebnahmeprozess nicht mehr integriert werden.
- Auch bei der Programmierung von Hilfsfunktionen konnte ein Optimierungspotenzial erkannt werden. So ist auffällig, dass die „schnelle Funktionsausgabe (Quickfunktion)“ für keine Hilfsfunktion verwendet wurde. Eine Betrachtung mit Hilfe der Software „Potenzialanalysator“ zeigt, dass die Verwendung zumindest für einige Funktionen durch den Maschinenhersteller parametriert wurde. So könnte beispielsweise „Spindel halt“ und „Kühlmittel aus“ als „Quickfunktion“ programmiert werden. Prinzipiell wäre auch darüber nachzudenken, ob nicht weitere Funktionen für die Verwendung als schnelle Funktionsausgabe parametriert werden könnten. Dies kann aber nur nach Rücksprache mit dem Werkzeugmaschinenhersteller geschehen.

- Ein sehr großes Optimierungspotenzial liegt auch in der Anpassung des programmierten Sicherheitsabstands. So könnte die Verkürzung der verschiedenen Sicherheitsabstände auf die in Kapitel 4.1 vorgeschlagenen Werte zu einer deutlichen Reduktion der technischen Nebenzeiten führen.

Durch Anwendung der Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten mit Hilfe einer CNC-Bearbeitungssimulation mit SIL und zusätzlich der realen Werkzeugmaschine konnten nachfolgend dargestellte Ergebnisse ermittelt werden:

Tabelle 7.2: Potenziale in Bezug auf die Gesamttaktzeit an einer Werkzeugmaschine zur Fertigung von Kurbelgehäusen

Werkzeug	Fertigungsverfahren	Werkzeugbahn: limitierte, unbestimmte Bahn	Bearbeitungs- reihenfolge	Sicherheits- abstand	Gesamtpotenzial je Werkzeug
T1	Fräsen	-5,5%	-0,0%	-6,7%	-12,3%
T2	Fräsen	-0,2%	-0,0%	-7,2%	-7,4%
T3	Bohren	-0,1%	-0,0%	-1,8%	-1,9%
T4	Bohren	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-0,0%
T5	Gewindeformen	-9,8%	-0,0%	-1,2%	-11,0%
T6	Bohren	-6,7%	-3,7%	-3,2%	-13,6%
T7	Gewindeformen	-5,4%	-2,8%	-0,0%	-8,2%
T8	Fräsen	-2,5%	-0,0%	-0,0%	-2,5%
T9	Fräsen	-2,6%	-0,0%	-3,1%	-5,7%
T10	Fräsen	-3,8%	-0,0%	-0,5%	-4,3%
T11	Fräsen	-0,7%	-0,0%	-0,0%	-0,7%
T12	Bohren	-3,4%	-0,0%	-5,6%	-9,1%
T13	Reiben	-2,2%	-0,0%	-3,1%	-5,3%
T14	Bohren	-2,1%	-0,0%	-8,1%	-10,2%
T15	Gewindeformen	-8,6%	-0,0%	-0,9%	-9,5%
T16	Bohren	-1,6%	-0,6%	-11,5%	-13,8%
T17	Gewindeformen	-17,7%	-0,4%	-0,5%	-18,6%
T18	Bohren	-0,7%	-2,6%	-2,7%	-6,0%
T19	Bohren	-0,0%	-9,6%	-0,0%	-9,6%
T20	Gewindeformen	-17,1%	-6,0%	-3,2%	-26,3%
T21	Bohren	-4,2%	-0,0%	-3,1%	-7,4%
T22	Reiben	-2,2%	-0,0%	-3,4%	-5,7%
T23	Reiben	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-0,0%
T24	Reiben	-1,9%	-0,0%	-0,0%	-1,9%
Gesamt		-4,4%	-0,9%	-2,6%	-7,9%

Durch die Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten konnte eine Taktzeitreduktion des exemplarisch ausgewählten Fertigungsprozesses von 7,9 Prozent aufgezeigt werden (vgl. Tabelle 7.2, inkl. Be-/ Entladen des Werkstücks). Durch eine Optimierung könnte die Effizienz des Fertigungsprozesses deutlich gesteigert und die freiwerdenden Kapazitäten dazu genutzt werden, zukünftig weitere Produkte im gleichen Fertigungssystem herzustellen. Jedoch ist anzumerken, dass es sich hierbei um eine Betrachtung einer einzelnen Werkzeugmaschine handelt, welche nicht zwingend den begrenzenden Faktor in der Fertigungslinie darstellt. Weitere Linienelemente, wie zum Beispiel eine Waschmaschine, können den Fertigungstakt auch begrenzen. Dieser Engpass müsste dann zuerst behoben werden, damit diese Reduktion technischer Nebenzeiten auch Wirkung zeigen würde.

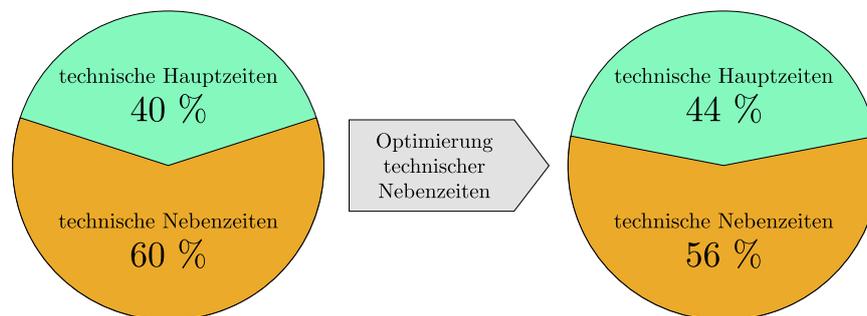


Abbildung 7.4: Anteile technischer Haupt- und Nebenzeiten vor und nach der Optimierung

7.1.3 Beispiel 3: Zylinderkopf

Während im zweiten Beispiel die NC-Bearbeitungsprogramme vom Maschinenhersteller entwickelt wurden, entstanden die Programme zur Fertigung eines Zylinderkopfs weitestgehend durch den Prozesseigner. Einzig einzelne Unterprogramme, wie das Werkzeugwechselprogramm, wurden durch den Maschinenhersteller bereitgestellt. So bot sich für den Prozesseigner der Vorteil, die NC-Bearbeitungsprogramme auf den Werkzeugmaschinen der Fertigungslinie schon vor der Inbetriebnahme nach den in Kapitel 4 beschriebenen Aspekten zu gestalten. Eine Potenzialanalyse in beobachtender Weise wie auch durch Analyse des NC-Programmarchivs konnte hierbei aber nicht durchgeführt werden, da es kein NC-Bearbeitungsprogramm als Ausgangspunkt gab.

Die Prämisse bei der Programmerstellung lautete, den Fertigungsprozess im Hinblick auf die technischen Nebenzeiten optimal zu gestalten. Begründet war dies durch die gleiche Forderung wie in Beispiel 2: Zukünftig weitere Bauteile auf der selben Linie fertigen zu können und dafür möglichst wenige neue Werkzeugmaschinen anschaffen zu müssen. Die Vorteile einer solchen frühzeitigen Optimierung liegen auf der Hand: Gehobene Potenziale beeinflussen die Fertigungskosten über einen Großteil des Lebenszyklus der Anlage, während die Beeinflussungsmöglichkeiten auf den Fertigungsprozess durch Anpassungen des

NC-Programms noch sehr groß sind. Diesen Sachverhalt haben auch Wabner u.a. (2014) beschrieben (vgl. Abbildung 7.5).

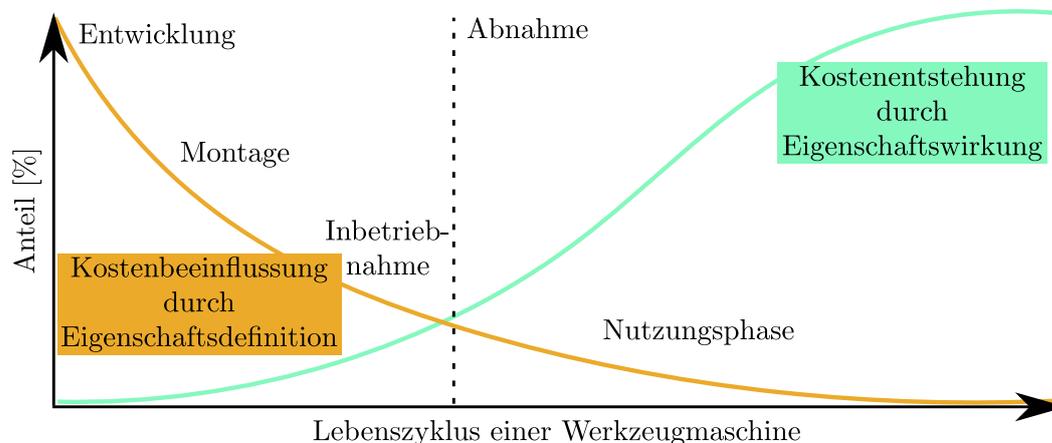


Abbildung 7.5: Kostenbeeinflussung durch Eigenschaftsdefinition und Kostenentstehung durch Eigenschaftswirkung (vgl. Wabner u.a. 2014)

Zwar gab es keinen Ausgangspunkt für das NC-Programm während des Entstehungsprozesses, jedoch konnte das Verfahren der NC-Programmarchivanalyse jederzeit als Kontrollfunktion für den Entwicklungsstand genutzt werden. Fehler oder ungenutzte Potenziale wurden so schnell aufgedeckt. Da die Inbetriebnahme noch bevor stand, konnte so auch ein erhöhter Aufwand durch die Werkzeugbahnoptimierung mittels genetischer Algorithmen in Kauf genommen werden. Es wurden zwei verschiedene NC-Programme erstellt, bei welchen die Werkzeugbahn mit dem Verfahren der limitierten, unbestimmten Bahn beziehungsweise mit Hilfe eines Genetischen Algorithmus bestimmt wurde. Die in Tabelle 7.3 dargestellten Potenziale beziehen sich dabei auf eine konventionelle Programmierung mit Geradeninterpolation. Insbesondere das Werkzeug T19 sticht dabei hervor. Bedingt durch einen sehr hohen Vorschub und eine kleine Bohrungstiefe und daraus resultierenden, sehr kurzen technischen Hauptzeiten, ergibt sich für dieses Werkzeug ein Optimierungspotenzial von mehr als vierzig Prozent. Auf die Verwendung von programmierten Wartezeiten oder Befehlen, welche einen Vorlaufstopp auslösen, wurde konsequent verzichtet - sofern dies möglich war. Auch der Sicherheitsabstand zwischen Werkzeug und Werkstück wurde nach den zuvor beschriebenen Aspekten programmiert. Die dargestellten Potenziale beziehen sich auf die Sicherheitsabstände wie sie bisher resultiert hätten (vgl. Abbildung 4.3). Gerade beim Gewindeformen (T21) wirkt sich durch die geringe resultierende Vorschubgeschwindigkeit eine Reduktion besonders deutlich aus. Die teilweise komplex ausfallenden Bearbeitungsreihenfolgen wurden mit Hilfe der Software „BESTWAY“ bestimmt und damit zeitoptimal programmiert. Die Potenziale beziehen sich auf die konventionelle Festlegung der Reihenfolge anhand Bearbeitungsstellennummer und „Augenmaß“. Bei komplexen Bohrbildern mit mehr als 25 Bearbeitungsstellen, wie bei Werkzeug T1, lassen sich so deutliche Potenziale heben. Letzt-

lich resultiert aus allen erfolgten Optimierungen technischer Nebenzeiten eine Reduktion der Gesamttaktzeit von 8,1 Prozent (inkl. Be-/ Entladen des Werkstücks).

Tabelle 7.3: Potenziale in Bezug auf die Gesamttaktzeit einer Werkzeugmaschine zur Fertigung von Zylinderköpfen

Werkzeug	Fertigungsverfahren	Werkzeughahn 1: limitierte, unbestimmte Bahn	Werkzeughahn 2: Genetischer Algorithmus	Bearbeitungs- reihenfolge	Sicherheits- abstand	Gesamtpotenzial je Werkzeug
T1	Bohren	-4,3%	-10,9%	-5,0%	-4,5%	-20,3%
T2	Bohren	-5,5%	-5,8%	-0,0%	-0,0%	-5,8%
T3	Bohren	-2,9%	-4,3%	-4,2%	-0,7%	-9,0%
T4	Planfräsen	-2,4%	-2,4%	-0,0%	-0,1%	-2,6%
T5	Schaftfräsen	-4,4%	-6,7%	-0,2%	-3,9%	-10,8%
T6	Bohren	-4,3%	-20,8%	-0,0%	-0,7%	-21,6%
T7	Bohren	-1,6%	-1,9%	-0,0%	-0,6%	-2,5%
T8	Tieflochbohren	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-0,6%	-0,6%
T9	Schaftfräsen	-5,7%	-5,7%	-0,0%	-1,1%	-6,8%
T10	Bohren	-8,5%	-9,0%	-0,8%	-0,5%	-10,2%
T11	Bohren	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-2,3%	-2,3%
T12	Bohren	-6,4%	-6,4%	-0,0%	-1,5%	-7,9%
T13	Tieflochbohren	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-1,1%	-1,1%
T14	Bohren	-8,8%	-8,8%	-0,0%	-0,9%	-9,7%
T15	Gewindeformen	-7,9%	-7,9%	-0,0%	-0,1%	-8,0%
T16	Schaftfräsen	-2,6%	-2,6%	-0,0%	-0,1%	-2,8%
T17	Bohren	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-2,0%	-2,0%
T18	Reiben	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-1,6%	-1,6%
T19	Bohren	-10,8%	-43,8%	-0,0%	-0,4%	-44,2%
T20	Bohren	-9,8%	-10,1%	-0,0%	-0,3%	-10,4%
T21	Gewindeformen	-0,0%	-0,0%	-3,6%	-6,7%	-10,4%
T22	Scheibenfräsen	-0,0%	-0,0%	-0,0%	-0,0%	0,0%
Gesamt		-3,4%	-6,1%	-0,9%	-1,2%	-8,1%

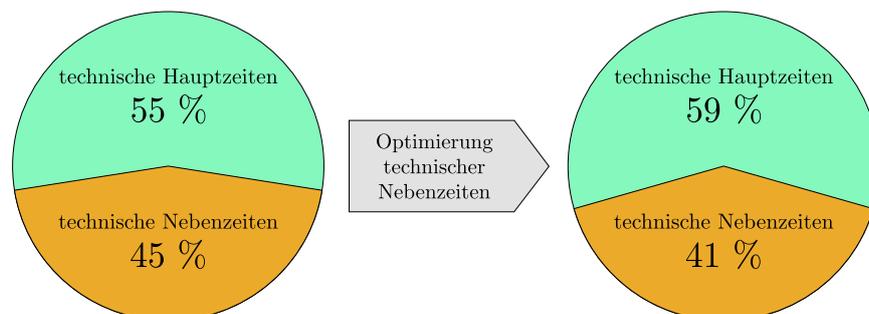


Abbildung 7.6: Anteile technischer Haupt- und Nebenzeiten vor und nach der Optimierung

7.2 Ergebnisse

In Kapitel 3 und 4 wurden eine Reihe unterschiedlicher Verfahren zur Erfassung und Analyse beziehungsweise Optimierung technischer Nebenzeiten behandelt. Ihre jeweiligen Vor- und Nachteile wurden beschrieben und gegeneinander in ein Verhältnis gesetzt. Für eine qualitative Bewertung der acht vorgestellten Potenzialanalyseverfahren sind drei Kriterien von Bedeutung: Das erste Kriterium ist die Güte, in welcher sich die technischen Nebenzeiten jeweils erfassen lassen. Nur durch eine hohe Genauigkeit, eine Verknüpfung zum NC-Code und die Nähe zur in Kapitel 2.1 getroffenen Definition technischer Nebenzeiten können Optimierungspotenziale zuverlässig erkannt werden. Neben der Erfassungsgüte besitzt auch die Effizienz in der Anwendung der einzelnen Verfahren eine große Bedeutung. So existieren einige Verfahren, welche eine sehr hohe Erfassungsgüte besitzen, aber aufgrund des hohen Durchführungsaufwands kaum effizient sind. Drittes und letztes Bewertungskriterium stellt die Automatisierbarkeit des jeweiligen Verfahrens dar. Viele der Potenzialanalyseverfahren sind in ihrer Anwendung komplex und aufwendig. Dem kann nur mit einer Automatisierung begegnet werden. Eine exemplarische Umsetzung in Computerprogramme ist in Kapitel 5 für die Prozessplanung und in Kapitel 6 für das Fertigungssystem vorgestellt worden. Erfahrungen in der Anwendung der einzelnen Verfahren wurden anhand vieler Umsetzungsprojekte in der Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten gesammelt. Eine Auswahl dieser Projekte konnte mittels dreier Beispiele in Kapitel 7.1 behandelt werden. Zur Bewertung der Optimierungsverfahren, welche in acht Gruppen zusammengefasst sind, wurden auch drei Kriterien festgelegt. Neben der zuvor beschriebenen Effizienz in der Anwendung des jeweiligen Verfahrens und der Automatisierbarkeit als Computerprogramm ist als drittes Kriterium die Effektivität definiert worden. So gilt ein Optimierungsverfahren als effektiv, wenn es einen großen Beitrag zur Reduktion technischer Nebenzeiten in einem Optimierungsprojekt liefern kann. Die Gründe, welche zur jeweiligen Bewertung führen, sind in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

7.2.1 Bewertung der Potenzialanalyseverfahren

Bezüglich der Erfassungsgüte sind die visuelle Beobachtung (unter der Zuhilfenahme einer Videokamera) wie auch die Diagnoseverfahren als am besten zu bewerten. Mit beiden Verfahren ist es möglich, auch sehr kleine technische Nebenzeiten zu erkennen, welche nur wenige Millisekunden dauern. Andere Verfahren, wie der Fernzugriff via OPC, sind technisch auf eine minimale Betrachtungsschärfe beschränkt, welche oftmals zu grob ist. Die schlechteste Erfassungsgüte weist wohl die CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern auf, da durch die unvollständige Abbildung des CNC-Kerns vieles nur unzureichend oder gar nicht abgebildet werden kann. Eine Erfassung technischer Nebenzeiten ist

damit immer eine Abschätzung. Dem gegenüber stehen die CNC-Bearbeitungssimulation mit Hardware-in-the-Loop oder Virtuellem CNC-Kern, welche den Fertigungsprozess wesentlich genauer abbilden können.

Keine der acht beschriebenen Verfahren zur Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten zeichnen sich durch eine hohe Effizienz aus. Sie alle sind in ihrer Anwendung aufwendig und ohne technische Hilfsmittel kaum sinnvoll einzusetzen. So ist die Analyse des NC-Programmarchivs, welches tausende Codezeilen besitzt, manuell nicht zu analysieren. Andere Verfahren, wie die Protokollierzyklen oder Diagnosefunktionen, erfordern immer ein Bedienen der CNC vor Ort.

Um die Effizienz solcher Analyseverfahren bei der Anwendung zu steigern, wurden diese weitestgehend automatisiert. Besonders die Erfassung und Analyse per Fernzugriff ließ sich durch die Integration in einen bestehenden Webservice weitestgehend automatisieren. Dem gegenüber stehen Verfahren, wie die CNC als Hardware-in-the-Loop, bei denen es sich als besonders nachteilig erweist, dass die CNC aufgebaut und mit einem Simulationscomputer verbunden werden muss. Zusätzlich muss auch das Simulationsmodell erstellt werden. Dies lässt sich aber alles nicht automatisieren. Auch eine automatisierte Analyse technischer Nebenzeiten, welche durch die visuelle Beobachtung gewonnen wird, ist nicht möglich. Die Analyse muss hier Schritt für Schritt manuell erfolgen. Eine abschließende Bewertung der Potenzialanalyseverfahren findet sich in nachfolgender Tabelle 7.4.

Tabelle 7.4: Bewertung der Potenzialanalyseverfahren

Verfahren	Erfassungsgüte	Effizienz	Automatisierbarkeit
Visuelle Beobachtung	+	○	○
Diagnosefunktionen	++	○	+
Protokollierzyklen	+	++	++
Fernzugriff via OPC	+	+	++
NC-Programmarchivanalyse	+	○	+
CNC-Bearb'simulation mit em. CNC-Kern	○	+	+
CNC-Bearbeitungssimulation mit HIL	++	○	○
CNC-Bearbeitungssimulation mit SIL	++	+	○

7.2.2 Bewertung der Optimierungsverfahren

Auch bei der Bewertung der Optimierungsverfahren gibt es deutliche Unterschiede innerhalb der einzelnen Kriterien. Während einige Verfahren eine große Effektivität nach ihrer Anwendung zeigen, eignen sich andere Verfahren nur, um den Fertigungsprozess um wenige Zehntelprozent zu optimieren. Besonders effektiv sind dabei die Anpassung des programmierten Sicherheitsabstandes, die Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen und die

„Anforderungsgerechte Parametersatzanzahl“. Wie in Kapitel 4.1 gezeigt wurde, kann die Absenkung des programmierten Sicherheitsabstandes um einen Millimeter schon eine deutliche Verkürzung der Taktzeit hervorrufen. Auch mit Hilfe der in Kapitel 4.3 vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Werkzeugbahn ist es möglich, weitere deutliche Potenziale zu heben.

Allerdings erweisen sich einige hoch effektive Verfahren in ihrer Anwendung als wenig effizient. Je nach gewähltem Verfahren zur Programmierung der Werkzeugbahn kann die Umsetzung einen deutlichen Mehraufwand bedeuten. Gerade die Steuerungsparametrierung ist durch eine einzelne Person an der Werkzeugmaschine kaum mehr zu erfüllen. Die Bestimmung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge kann bei vielen unsymmetrisch verteilten Bearbeitungsstellen zu einem Travelling Salesman-Problem führen, das manuell nicht mehr lösbar ist.

Deshalb wurde auch bei den Optimierungsverfahren versucht, diese durch Computersysteme weitestgehend zu automatisieren. Mit der vorgestellten Software „BESTWAY“ kann ein TSP in wenigen Sekunden gelöst werden - und das durch nur wenige Benutzereingaben. Bei den Werkzeugbahnen eignen sich vor allem die Anwenderzyklen des Verfahrens der „limitierten, unbestimmten Werkzeugbahn“, um NC-Programme schnell zu entwickeln und die Werkzeugbewegung automatisiert berechnen zu lassen. Mit Hilfe der Erweiterung von HMI-Masken wurde dafür gesorgt, dass Missverständnisse und Fehleingaben bei der Programmierung kaum mehr auftreten können. Andere Verfahren zur Optimierung technischer Nebenzeiten lassen sich dagegen nur schwer verbessern. So beruht beispielsweise das Wissen, wann der Satzvorlauf angehalten werden muss, sehr oft auf der Erfahrung des Programmierers. Eine abschließende Bewertung der verschiedenen Verfahren zur Optimierung technischer Nebenzeiten findet sich in Tabelle 7.5.

Tabelle 7.5: Bewertung der Optimierungsverfahren

Verfahren	Effektivität	Effizienz	Automatisierbarkeit
programmierter Sicherheitsabstand	++	++	+
Werkzeugbahn	++	+	+
Bearbeitungsreihenfolge	+	o	++
Steuerungsparametrierung	++	o	o
anforderungsger. Parametersatzanzahl	+	+	o
Hilfsfunktionen	+	++	o
Wartemarken & Kanalsynchronisation	o	+	+
Satzvorlauf & Programmvorverarbeitung	o	+	o

8 Zusammenfassung und Ausblick

Im letzten Kapitel dieser Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung der zuvor behandelten Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten in der spanenden Fertigung und ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen in der Steuerungstechnik und Simulation, welche dazu beitragen könnten, die technischen Nebenzeiten besser analysieren und optimieren zu können.

8.1 Zusammenfassung

Zu Beginn dieser Arbeit wurde auf die Wichtigkeit eines jeden Hebels zur Effizienzsteigerung eingegangen. Fertigungssysteme, insbesondere die der automobilen Großserienfertigung, unterliegen einem ständigen Optimierungsdruck. Durch verschiedenste Maßnahmen, wie dem KVP, wird versucht, die Wirtschaftlichkeit eines Fertigungsprozesses zu erhalten oder zu erhöhen. Dabei rücken die technischen Nebenzeiten immer mehr in den Fokus. Gerade durch die Abkehr von Transferstraßen hin zu universellen Bearbeitungszentren nehmen die technischen Nebenzeiten mittlerweile einen wesentlichen Teil der Fertigungszeit ein. Das Verständnis dieser technischen Nebenzeiten ist dabei aber nicht immer eindeutig. Doch gerade für eine zufriedenstellende Optimierbarkeit muss eine eindeutige Diskussionsgrundlage vorhanden sein. Diese wurde durch eine eigene Definition in Kapitel 2.1 beschrieben.

Eine auf der dieser Definition aufbauende Optimierung technischer Nebenzeiten kann aber nur zielgerichtet und effektiv erfolgen, wenn zu hebende Potenziale zuvor bekannt sind. Hierzu wurden in Kapitel 3 mehrere Verfahren zur Potenzialanalyse behandelt. Neben den vier Verfahren zur beobachtenden Prozessanalyse wurde auch das Verfahren durch Analyse des NC-Programmarchivs erläutert. Hinzu kam eine Verknüpfung dieser beiden Verfahrensguppen. Die CNC-Bearbeitungssimulation mit emuliertem CNC-Kern, mit einer CNC als Hardware-in-the-Loop und die CNC-Bearbeitungssimulation mit CNC-Kern als Software-in-the-Loop stellen den Brückenschlag dar, da sie es mit Hilfe des NC-Programmarchivs und weiterer Daten ermöglichen, den Fertigungsprozess zu visualisieren und damit auch beobachtbar zu machen.

Mit Hilfe der eigenen Definition und den vorgestellten Verfahren zur Potenzialanalyse wurde daran anknüpfend die eigentliche Methode zur Reduktion technischer Nebenzei-

ten behandelt. Sie gliedert sich in acht Teilbereiche, welche wiederum alle aus mehreren einzelnen Optimierungsverfahren bestehen. Der wesentliche Teil dieser Verfahren ist dem Stand der Technik zuzurechnen. Darüber hinaus wurden auch neue Verfahren entwickelt. Hierzu zählt vor allem die Optimierung des programmierten Sicherheitsabstands. Dazu wurden Untersuchungen angestellt, welche die große Bedeutung der korrekten Wahl des Sicherheitsabstands zeigten und es wurde ein Programmierstandard entwickelt, welcher dazu beitragen soll, technische Nebenzeiten umfassend und dauerhaft zu minimieren. Auch die Bestimmung der schnellsten Reihenfolge der Bearbeitungsschritte für den Einsatz eines Werkzeugs durch Vorzugsrichtung oder Lösung eines Travelling-Salesman-Problems wurde ausführlich vorgestellt. Durch die Programmierung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge eines Werkzeugs, welche nicht unbedingt der vom Weg her kürzesten Reihenfolge entspricht, gelingt es, technische Nebenzeiten weiter zu minimieren. Aber auch die Programmierung der Werkzeugbahn zwischen zwei Bearbeitungen, auch Leerfahrt genannt, stand im Fokus. Durch die Programmierung der Werkzeugbahn mittels des Verfahrens der „limitierten, unbestimmten Werkzeugbahn“ ist es auf schnellem Wege möglich, Potenziale im mittleren einstelligen Prozentbereich (bezogen auf die Gesamttaktzeit) zu heben. Durch aufwendigere Verfahren, wie Genetischer Algorithmus, ist es zudem möglich, die Werkzeugbahn noch dynamischer zu gestalten und so weitere Potenziale zu heben. Welches der oftmals konkurrierenden Verfahren Anwendung finden soll, liegt aber im Ermessen des Anwenders. Er muss für ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen sorgen.

Viele der behandelten Optimierungs- und Potenzialanalyseverfahren können in ihrer Anwendung sehr komplex sein. Eine rein manuelle Verfahrensnutzung würde vielfach scheitern oder zu einem unbefriedigenden Aufwand-Nutzen-Verhältnis führen. Deshalb wurden in Kapitel 5 und 6 exemplarische Integrationsmöglichkeiten in die Prozessplanung und das Fertigungssystem entwickelt und behandelt. Dabei wurde jeweils ein Verfahren zur Potenzialanalyse und ein Optimierungsverfahren als Computerprogramm umgesetzt. So ist es mit Hilfe der Software „BESTWAY“ möglich, die schnellste Bearbeitungsreihenfolge anhand der Bearbeitungsstellen und der Maschinendynamik weitgehend automatisiert zu ermitteln. Mit dem „Potenzialanalysator“ kann das NC-Programmarchiv ausgelesen werden. Es werden wichtige Informationen zur Werkzeugmaschine und CNC wie auch den verwendeten NC-Programmen dargestellt. Anschließend werden durch das Computerprogramm Optimierungsverfahren vorgeschlagen, welche für den spezifischen Anwendungsfall ein günstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis versprechen.

Für eine Integration in das Fertigungssystem wurde das Potenzialanalyseverfahren des Fernzugriffs via OPC als Webservice automatisiert und in ein bestehendes Prozessüberwachungssystem integriert. Der Anwender kann so dezentral und automatisiert aufwendige Prozessanalysen durchführen lassen. Mit den vorgestellten NC-Zyklen zur Bestimmung ei-

ner dynamischeren Werkzeugbahn und den damit verbundenen HMI-Masken ist es für den Anwender möglich, NC-Bearbeitungsprogramme fertigungsnah anzupassen und zu optimieren. Durch verborgene Abfragen in den HMI-Masken der Werkzeugmaschine werden Fehleingaben weitestgehend unterbunden.

Abschließend wurde eine Validierung und Bewertung der gesamten Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten durchgeführt. Dies erfolgte anhand dreier Beispiele aus der Großserienfertigung automobiler Antriebsstrangkomponenten. Während die Optimierung im ersten Beispiel in der Betriebsphase und damit rein reaktiv erfolgte, war es das Ziel der Beispiele 2 und 3, Potenziale schon vor beziehungsweise während der Inbetriebnahme des Fertigungssystems zu erkennen. Die in Beispiel 2 erkannten Potenziale dienten zur Verringerung beziehungsweise Abschätzung des Investitionsbedarfs der zukünftigen Erweiterung des Fertigungssystems. In Beispiel 3 wurde schon bei der Erstellung des NC-Programms darauf geachtet, dass die technischen Nebenzeiten möglichst gering gehalten werden. Dies geschah unter vorausschauender Anwendung der Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten.

Durch die erzielten Ergebnisse aus den drei behandelten Beispielen der realen automobilen Großserienfertigung konnte gezeigt werden, dass mit der entwickelten Methode eine deutliche Reduktion der technischen Nebenzeiten erreicht werden kann. Damit ist es möglich, die Effizienz verschiedener Produktionsprozesse deutlich zu steigern. Die miteinander verknüpften Kapitel dieser Arbeit sind in nachfolgender Abbildung 8.1 nochmals zusammengefasst.

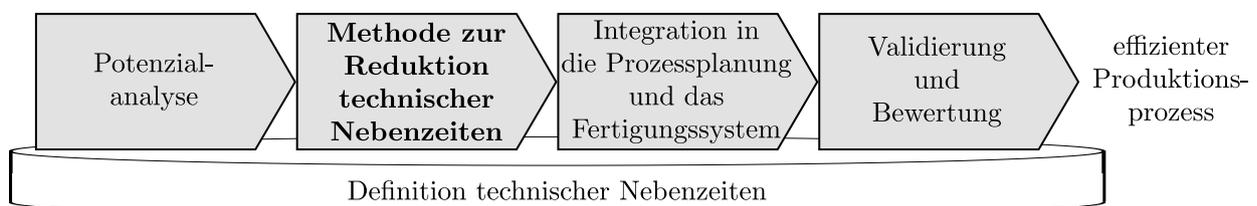


Abbildung 8.1: Zusammenfassung der Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten

8.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit behandelte Methode zur Reduktion technischer Nebenzeiten versteht sich nicht als geschlossenes System. Vielmehr ist abzusehen, dass durch die Weiterentwicklung der Steuerungs- und Simulationstechnik auch die behandelte Methode Anpassungen erfahren muss.

Kurzfristig wird sich mit Sicherheit die Verwendung der Simulation mit CNC-Kern als Software-in-the-Loop durchsetzen und dazu beitragen, CNC-Bearbeitungssimulation einen deutlichen Entwicklungsschub zu geben. Durch die Integration eines vollständigen CNC-

Kerns in die CNC-Bearbeitungssimulation auf einem Computer wird es möglich, auch den gesamten Umfang der NC-Befehle einer echten Steuerung simulieren zu können. Der Betrieb einer CNC als Hardware-in-the-Loop könnte damit bei der Potenzialanalyse technischer Nebenzeiten obsolet werden. Durch die Simulation mit SIL kann eine Potenzialanalyse genau und zugleich einfach erfolgen. Optimierungsmethoden, wie die Werkzeugbahnerzeugung mittels eines Genetischen Algorithmus, können so schon virtuell durchgeführt werden. Eine aufwendige Ermittlung während der Inbetriebnahme oder gar der Betriebsphase kann so weitestgehend entfallen. Auch eine Erweiterung des in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Computerprogramms „Potenzialanalysator“ könnte dazu beitragen, die Optimierung technischer Nebenzeiten für den Anwender weiter zu vereinfachen. So könnte beispielsweise anhand erkannter Potenziale auch eine vollständig automatisierte Optimierung erfolgen. Die Umsetzung dieses Gedankens bedarf allerdings eines großen Entwicklungsaufwands. Auch wäre die Integration der in dieser Arbeit vorgestellten Computerprogramme in die im Unternehmen genutzten CAD-CAM-Systeme denkbar. So könnte auf den - oftmals fehleranfälligen - Ex- und Import von Daten verzichtet werden. Beispielsweise könnte die Ermittlung der schnellsten Bearbeitungsreihenfolge so direkt in den CAD-CAM-Systemen erfolgen.

Mittelfristig wäre auch eine Erweiterung der in Kapitel 4 behandelten Methodengruppe der „Anforderungsgerechten Parametersatzanzahl“ einer Siemens Sinumerik CNC denkbar. Sie ist bisher zwar auf einen Array von jeweils sechs Feldern beschränkt, doch wäre eine Erweiterung sehr gut vorstellbar. So könnte für jedes Werkzeug und auch für jedes Werkstück eine eigene Parametrierung der Achsen von Spindel und Werkzeugmaschinentisch erfolgen. Das dynamische Verhalten könnte damit während des Werkstück- beziehungsweise Werkzeugwechsels erfolgen. Allerdings müssten hierfür erst Computersysteme entwickelt werden, welche den Anwender bei der Parametrierung unterstützen - und das am besten schon vor der Inbetriebnahme. Eine rein manuelle Parametrierung während der Inbetriebnahme würde wohl einen zu großen Aufwand darstellen. Auch ist zu erkennen, dass sowohl Steuerungs- als auch Werkzeugmaschinenhersteller zukünftig Verfahren und Programme zur Verfügung stellen werden, welche die Optimierung technischer Nebenzeiten weiter automatisieren.

Längerfristig ist zu vermuten, dass durch neue Steuerungsgenerationen, welche in den nächsten Jahren auf dem Markt erscheinen werden, auch neue Möglichkeiten der Reduktion technischer Nebenzeiten geschaffen werden. Durch die Offenheit des CNC-Kerns einiger CNC-Hersteller wäre es auch denkbar, eigenständige Funktionen neu zu entwickeln (vgl. Weck 2001, S. 206ff). So könnten an einer Sinumerik Steuerung eigene „Compile Cycles“ entwickelt werden, um gewünschte Funktionen zu schaffen (vgl. Siemens 2015a). Dieser Weg ist für einen einzelnen Endanwender aber zumeist zu kostenintensiv.

9 Anhang

9.1 Verfügbarkeit von Programmierbefehlen

Tabelle 9.1: Verfügbarkeit von NC-Befehlen nach Herstellern in Bezug zur Reduktion technischer Nebenzeiten (vgl. Siemens 2013a; Bosch Rexroth 2010c; Fanuc 2010a)

	Siemens Sinumerik 840D sl	Bosch Rexroth MTX	Fanuc CNC 31i
Bahnsteuerbetrieb	✓	✓	✓
Genauhalt	✓	✓	✓
Hilfsfunktionen o. A. ¹	✓	✓	○
Parametersatzanwahl	✓	○	○
Polynome	✓	✓	○
Positionierachsbetrieb	✓	✓	○
Programmvorverarbeitung	✓	✓	○
Satzvorlauf ²	✓	✓	○
Splines	✓	✓	○
Synchronaktionen	✓	✓	○

¹ ohne Ausführungsbestätigung

² Vorverarbeitung von NC-Sätzen, der Begriff „Satzvorlauf“ ist unterschiedlich belegt.

9.2 Dynamikwerte weiterer Werkzeugmaschinen

Tabelle 9.2: Achsdynamik eines Bearbeitungszentrums für die Fertigung von Zylinderköpfen

	X-Achse	Y-Achse
max. Geschwindigkeit	2 $\frac{m}{s}$	2 $\frac{m}{s}$
max. Beschleunigung	15 $\frac{m}{s^2}$	15 $\frac{m}{s^2}$
max. Ruck	500 $\frac{m}{s^3}$	500 $\frac{m}{s^3}$

Tabelle 9.3: Achsdynamik eines Bearbeitungszentrums für die Fertigung von Schiebergehäusen

	X-Achse	Y-Achse
max. Geschwindigkeit	1,5 $\frac{m}{s}$	1,25 $\frac{m}{s}$
max. Beschleunigung	7 $\frac{m}{s^2}$	4,5 $\frac{m}{s^2}$
max. Ruck	80 $\frac{m}{s^3}$	150 $\frac{m}{s^3}$

9.3 Berechnungen und Versuche zur Bewegungsdauer

1. Phase konstanten positiven Rucks:

mit den Anfangsbedingungen: $j(0) = a(0) = v(0) = s(0) = 0$

$$\vec{j}(t) = j_{max} = konst. \quad (9.1)$$

$$\rightarrow \vec{a}(t) = j_{max} \cdot t \quad (9.2)$$

$$\rightarrow \vec{v}(t) = \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t^2 \quad (9.3)$$

$$\rightarrow \vec{s}(t) = \frac{1}{6} \cdot j_{max} \cdot t^3 \quad (9.4)$$

daraus folgt:

$$t_1 = \frac{a_{max}}{j_{max}} \quad (9.5)$$

$$\rightarrow \vec{v}(t_1) = \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 \quad (9.6)$$

2. Phase konstanter Beschleunigung:

mit den Randbedingungen: $\vec{a}(t_1) = a_{max} = j_{max} \cdot t_1$ und $\vec{v}(t_1) = \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2$

$$\vec{a}(t) = a_{max} = konst. \quad (9.7)$$

$$\rightarrow \vec{v}(t) = a_{max} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 = j_{max} \cdot t_1 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 \quad (9.8)$$

$$\rightarrow \vec{s}(t) = \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1 \cdot t^2 + \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 \cdot t + \frac{1}{6} \cdot j_{max} \cdot t_1^3 \quad (9.9)$$

daraus folgt:

$$\vec{v}(t_2) = a_{max} \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 = v_{max} - \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 \quad (9.10)$$

$$\rightarrow t_2 = \frac{v_{max} - j_{max} \cdot t_1^2}{a_{max}} \quad (9.11)$$

3. Phase konstanten negativen Rucks:

mit den Randbedingungen: $\vec{a}(t_2) = a_{max}$ und $\vec{v}(t_2) = v_{max} - \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2$

$$\vec{j}(t) = -j_{max} = konst. \quad (9.12)$$

$$\rightarrow \vec{a}(t) = -j_{max} \cdot t + a_{max} = -j_{max} \cdot t + j_{max} \cdot t_1 \quad (9.13)$$

$$\rightarrow \vec{v}(t) = -\frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t^2 + a_{max} \cdot t + v(t_2) \quad (9.14)$$

$$= -j_{max} \cdot t^2 + j_{max} \cdot t_1 \cdot t + v_{max} - \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 \quad (9.15)$$

$$\rightarrow \vec{s}(t) = -\frac{1}{6} \cdot j_{max} \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot a_{max} \cdot t^2 + v(t_2) \cdot t + s(t_2) \quad (9.16)$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{6} \cdot j_{max} \cdot t^3 + \frac{1}{2} \cdot a_{max} \cdot t^2 + v(t_2) \cdot t + a_{max} \\
 &\quad + \frac{1}{2} \cdot j_{max} \cdot t_1^2 \cdot t_2 + \frac{1}{6} \cdot j_{max} \cdot t_1^3
 \end{aligned} \tag{9.17}$$

daraus folgt:

$$t_3 = t_2 + t_1 = \frac{v_{max} - j_{max} \cdot t_1^2}{a_{max}} + \frac{a_{max}}{j_{max}} \tag{9.18}$$

4. Phase konstanter Geschwindigkeit:

$$\vec{v}(t) = v_{max} = konst. \rightarrow j(t) = a(t) = 0 \tag{9.19}$$

5. Phase der Verzögerung bis zum Stillstand:

Da die Werkzeugmaschine im Allgemeinen mit den gleichen Dynamikparametern verzögert wie sie auch beschleunigt, handelt es sich um ein spiegelbildliches Abbild der Beschleunigung (Phase 1 bis 3). Die Formeln einer Bewegung von Stillstand zu Stillstand können in Kapitel 4.3.2 betrachtet werden.

Auf einer Werkzeugmaschine mit der in Tabelle 4.4 dargestellten Achsdynamik wurden verschiedene Achsbewegungen durchgeführt. Die jeweiligen Strecken in X- und Y-Richtung sind der zweiten Spalte zu entnehmen. Die benötigten Zeiten wurden auf der CNC erfasst und sind als t_{real} gezeigt. Nachfolgend wurden die Zeiten mit Hilfe der zuvor und in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Formeln berechnet. Für t_{vaj} wurde neben maximaler Achsgeschwindigkeit und maximaler Achsbeschleunigung auch der maximale axiale Ruck berücksichtigt. Bei t_{va} gilt die Annahme, dass der Ruck unendlich ist (vgl. Kapitel 2.3.1).

Tabelle 9.4: Vergleichsmessungen zwischen realen Messergebnissen und Berechnungen mit Hilfe der Formeln (keine Interpolation der Achsen, Koordinaten in mm)

Bewegung von	Bewegung nach	t_{real}	t_{vaj}		t_{va}	
X=0 Y=0	X=50 Y=0	0,432 s	0,400 s	(-7 %)	0,193 s	(-55 %)
	X=75 Y=0	0,492 s	0,458 s	(-7 %)	0,218 s	(-57 %)
	X=100 Y=0	0,534 s	0,504 s	(-6 %)	0,243 s	(-54 %)
	X=200 Y=0	0,667 s	0,635 s	(-5 %)	0,343 s	(-49 %)
	X=400 Y=0	0,829 s	0,800 s	(-3 %)	0,543 s	(-35 %)
	X=600 Y=0	1,032 s	1,000 s	(-3 %)	0,743 s	(-28 %)
	X=20 Y=100	0,324 s	0,295 s	(-10 %)	0,224 s	(-31 %)
	X=100 Y=300	0,534 s	0,504 s	(-6 %)	0,387 s	(-28 %)
	X=400 Y=5	0,829 s	0,800 s	(-3 %)	0,543 s	(-34 %)
	X=350 Y=200	0,798 s	0,765 s	(-4 %)	0,493 s	(-38 %)
Durchschnittliche absolute Abweichung			$f_{vaj} = 5 \%$		$f_{va} = 41 \%$	

9.4 NC-Programm eines genetischen Algorithmus

Nachfolgend ist ein NC-Programm für eine Siemens Sinumerik 840D aufgeführt, mit welchem es möglich ist, einen Bergsteigeralgorithmus zur Ermittlung des schnellsten Splines auszuführen. Die Ergebnisse der Optimierung werden automatisch auf der Steuerung dokumentiert.

```

1 ;=====
2 ; HILLCLIMBER - Programm zum Lösen eines Optimierungsproblems
3 ; mit Hilfe eines Hillclimbing-Algorithmus
4 ;-----
5 ; Version 2.8 - 31.03.2015 - 3D mit Störgeometrie
6 ;=====
7 DEF REAL _XS,_YS,_ZS,_XZ,_YZ,_ZZ,_XA,_YA,_XB,_YB,_XC,_YC,_XD,_YD,_PROBGEOALT,
8 _CORR,_LX,_LY,_LZS,_LZZ,_JUMP,_JUMPSTART,_JUMPEND,_BDS,_BDZ,_ZBD
9 DEF INT _ERROR,_STARTDENSE,_N,_M,_O,_Q=0,_R,_JUMPER,_FEED1,_SPEED1
10 DEF REAL _MINTIME[4],_P1X[1000],_P1Z[1000],_P2X[1000],_P1Y[1000],_P2Y[1000],
11 _P2Z[1000],_TIME[1000],_Variable[6]
12 DEF BOOL _DEBUG=TRUE,_REAL_MT=FALSE
13 ;=====
14 ; Einstellbare Werte:
15 ;-----
16 _JUMPSTART=16 ; Startwert der Sprungweite in mm
17 _JUMPEND=0.5 ; Abbruchkriterium der Sprungweite in mm
18 _STARTDENSE=50 ; Anzahl der Teilstrecken/ Punktedichte
19 _FEED1=800 _SPEED1=8500 ; Vorschub und Drehzahl Bearbeitung
20 _XS=0 _YS=0 _ZS=0 ; Startposition Oberfläche
21 _XZ=88 _YZ=-67 _ZZ=20 ; Zielposition Oberfläche
22 _XA=20 _YA=0 ; Störgeometriepunkt A
23 _XB=10 _YB=-40 ; Störgeometriepunkt B
24 _XC=60 _YC=10 ; Störgeometriepunkt C
25 _XD=30 _YD=-70 ; Störgeometriepunkt D
26 _PROBGEOALT=44 ; Störgeometriehöhe
27 _CORR=0 ; Korrekturwert/ Sicherheitszuschlag
28 _BDS=24 _BDZ=24 ; Bohrungstiefen
29 BTAN ETAN ; Übergang Splineanfang und -ende
30 ;-----
31 ; Initialwerte:
32 ;-----
33 $P_UIFR[50]=CTrans(X,300, Y,200, Z, 50) ; Nullpunktverschiebung G550
34 T=1 M6
35 _JUMP=_JUMPSTART*2
36 _LX=ABS(_XZ-_XS) _LY=ABS(_YZ-_YS) _LZS=_ZS-_BDS _LZZ=_ZZ-_BDZ
37 GO G60 G601 G550 X=_XS Y=_YS Z=_ZS-_BDS F=_FEED1 S=_SPEED1
38 IF ISFILE("HILLCLIMBPROT")== TRUE ;Protokollierungsheader
39 DELETE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT")
40 ENDIF
41 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT", "=====")
42 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT","HILLCLIMBER (c) 2015 Thomas Bosch")
43 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT","Protokoll vom "<<$A_DAY<<".<<$A_MONTH<<".<<
44 $A_YEAR<<" "<<$A_HOUR<<":"<<$A_MINUTE<<" Uhr")
45 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT", "=====")
46 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT","Start: X="<<_XS<<" Y="<<_YS<<" Z="<<_ZS<<" Ziel:
47 X="<<_XZ<<" Y="<<_YZ<<" Z="<<_ZZ)
48 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT","Bohrtiefen:"<<_BDS<<" und "<<_BDZ" Störgeometrie
49 Z:"<<_PROBGEOALT)
50 WRITE(_ERROR,"HILLCLIMBPROT", "-----")
51 ; Bergsteiger-Definition:
52 ;-----
53 $AC_TIMER[3]=0
54 IF (_PROBGEOALT==_ZZ) AND (_ZZ==_ZS) ;Wenn keine Störgeometrie vorhanden
55 IF (_XS<=_XZ)
56 _XA=_XS+_LX/2 _XC=_XS+_LX/2
57 ELSE
58 _XA=_XS-_LX/2 _XC=_XS-_LX/2
59 ENDIF
60 IF (_YS<=_YZ)
61 _YA=_YS+_LY/2 _YC=_YS+_LY/2
62 ELSE
63 _YA=_YS-_LY/2 _YC=_YS-_LY/2
64 ENDIF
65 IF (_LY<>0) AND (_LX<>0)
66 _XB=_XA-1 _YB=_YA-( _XS-_XZ)/(_YZ-_YS)

```

```

63     _XD=_XA-1  _YD=_YA-( _XS- _XZ)/( _YZ- _YS)
64     ELSE
65         IF  _LX==0
66             _XB=_XA-1  _YB=_YA+0.01
67             _XD=_XA-1  _YD=_YA+0.01
68         ELSE
69             _XB=_XA  _YB=_YA-1
70             _XD=_XA  _YD=_YA-1
71         ENDIF
72     ENDIF
73 ENDIF
74 IF  _LX<>0
75     FOR  _M=0 TO  _STARTDENSE
76         FOR  _N=_M TO  _STARTDENSE
77             IF  ( _XS< _XZ)
78                 IF  _XS+_M/_STARTDENSE*_LX<=_XA
79                     _P1X[_Q]= _M/_STARTDENSE*_LX+ _XS
80                     IF  _N/_STARTDENSE*_LX+_XS>=_XB
81                         _P2X[_Q]=_N/_STARTDENSE*_LX+_XS  _Q=_Q+1
82                     ENDIF
83                 ENDIF
84             ELSE
85                 IF  _XS-_M/_STARTDENSE*_LX>=_XA
86                     _P1X[_Q]= _XS-_M/_STARTDENSE*_LX
87                     IF  _XS-_N/_STARTDENSE*_LX<=_XB
88                         _P2X[_Q]=_XS-_N/_STARTDENSE*_LX  _Q=_Q+1
89                     ENDIF
90                 ENDIF
91             ENDIF
92         ENDFOR
93     ENDFOR
94     FOR  _R=0 TO  _Q-1
95         IF  ( _YS< _YZ)
96             IF  ( _PROBGEALT==_ZZ) AND  ( _ZZ==_ZS)
97                 _P1Y[_R]= _YS+ABS( _YA- _YS)/2
98                 _P2Y[_R]= _YZ-ABS( _YC- _YZ)/2
99             ELSE
100                 _P1Y[_R]= _YS+ABS((MINVAL( _YA , _YB)- _YS))/2
101                 _P2Y[_R]= _YZ-ABS((MINVAL( _YC , _YD)- _YZ))/2
102             ENDIF
103         ELSE
104             IF  ( _PROBGEALT==_ZZ) AND  ( _ZZ==_ZS)
105                 _P1Y[_R]= _YS-ABS( _YA- _YS)/2
106                 _P2Y[_R]= _YZ+ABS( _YC- _YZ)/2
107             ELSE
108                 _P1Y[_R]= _YS-ABS((MINVAL( _YA , _YB)- _YS))/2
109                 _P2Y[_R]= _YZ+ABS((MINVAL( _YC , _YD)- _YZ))/2
110             ENDIF
111         ENDIF
112     ENDFOR
113 ELSE
114     FOR  _M=0 TO  _STARTDENSE
115         FOR  _N=_M TO  _STARTDENSE
116             IF  ( _YS< _YZ)
117                 IF  _YS+_M/_STARTDENSE*_LY<=_YA
118                     _P1Y[_Q]= _M/_STARTDENSE*_LY+ _YS
119                     IF  _N/_STARTDENSE*_LY+_YS>=_YB
120                         _P2Y[_Q]=_N/_STARTDENSE*_LY+_YS  _Q=_Q+1
121                     ENDIF
122                 ENDIF
123             ELSE
124                 IF  _YS-_M/_STARTDENSE*_LY>=_YA
125                     _P1Y[_Q]= _YS-_M/_STARTDENSE*_LY
126                     IF  _YS-_N/_STARTDENSE*_LY<=_YB
127                         _P2Y[_Q]=_YS-_N/_STARTDENSE*_LY  _Q=_Q+1
128                     ENDIF
129                 ENDIF
130             ENDIF
131         ENDFOR
132     ENDFOR
133     FOR  _R=0 TO  _Q-1
134         IF  ( _XS< _XZ)
135             IF  ( _PROBGEALT==_ZZ) AND  ( _ZZ==_ZS)
136                 _P1X[_R]= _XS+ABS( _XA- _XS)/2
137                 _P2X[_R]= _XZ-ABS( _XC- _XZ)/2
138             ELSE
139                 _P1X[_R]= _XS+ABS((MINVAL( _XA , _XB)- _XS))/2
140                 _P2X[_R]= _XZ-ABS((MINVAL( _XC , _XD)- _XZ))/2
141             ENDIF

```

```

142         ELSE
143             IF (_PROBGEOALT==_ZZ) AND (_ZZ==_ZS)
144                 _P1X[_R]=_XS-ABS(_XA-_XS)/2
145                 _P2X[_R]=_XZ+ABS(_XC-_XZ)/2
146             ELSE
147                 _P1X[_R]=_XS-ABS((MINVAL(_XA,_XB)-_XS))/2
148                 _P2X[_R]=_XZ+ABS((MINVAL(_XC,_XD)-_XZ))/2
149             ENDIF
150         ENDIF
151     ENDFOR
152 ENDIF
153 IF _PROBGEOALT==_ZZ
154     FOR _O=0 TO _Q-1
155         _P1Z[_O]=10 _P2Z[_O]=10
156     ENDFOR
157 ELSE
158     FOR _O=0 TO _Q-1
159         _P1Z[_O]=_PROBGEOALT _P2Z[_O]=_PROBGEOALT
160     ENDFOR
161 ENDIF
162 ;=====
163 ; Bewegungsstart für alle Bergsteiger:
164 ;=====
165 FOR _N=0 TO _Q-1
166     $AC_TIMER[1]=0
167     GO G64 Z=_ZS
168     CSPLINE X=_P1X[_N] Y=_P1Y[_N] Z=_P1Z[_N] F=999999
169     X=_P2X[_N] Y=_P2Y[_N] Z=_P2Z[_N]
170     X=_XZ Y=_YZ Z=_ZZ
171     G1 G60 G601 Z=_LZZ F=_FEED1
172     _TIME[_N]=$AC_TIMER[1]
173     IF _REAL_MT==TRUE
174         GO G64 Z=_P2Z[_N]+3
175         GO G64 X=_XS Y=_YS
176         GO G60 G601 Z=_LZS
177     ELSE
178         GO G60 G601 X=_XS Y=_YS Z=_LZS
179     ENDIF
180 ENDFOR
181 ;=====
182 ; Auswahl des besten Bergsteigers:
183 ;=====
184 _MINTIME[1]=_TIME[0] _MINTIME[0]=0
185 FOR _N=1 TO _Q-1
186     IF _MINTIME[1]>_TIME[_N]
187         _MINTIME[1]=_TIME[_N] _MINTIME[0]=_N
188     ENDIF
189 ENDFOR
190 ;=====
191 ; Bewegung des besten Bergsteigers:
192 ;=====
193 _Variable[0]=_P1X[_MINTIME[0]] _Variable[1]=_P1Y[_MINTIME[0]]
194 _Variable[2]=_P1Z[_MINTIME[0]] _Variable[3]=_P2X[_MINTIME[0]]
195 _Variable[4]=_P2Y[_MINTIME[0]] _Variable[5]=_P2Z[_MINTIME[0]]
196 ;=====
197 JUMPO: ; Wiedereinstieg nach Sprungweitenreduktion
198 _JUMP=_JUMP/2 ; Halbieren der Sprungweite
199 GOTOF CYCLE1END
200 ;=====
201 CYCLE1:; Bewegungszyklus:
202 ;=====
203 $AC_TIMER[1]=0 $AC_TIMER[2]=0
204 GO G64 Z=_ZS
205 CSPLINE F=999999 X=_Variable[0] Y=_Variable[1] Z=_Variable[2]
206 X=_Variable[3] Y=_Variable[4] Z=_Variable[5]
207 X=_XZ Y=_YZ Z=_ZZ
208 WHEN $AA_IW[Z]<=_ZZ DO $AC_TIMER[2]=-1
209 G1 G60 G601 Z=_LZZ F=_FEED1
210 _TIME[0]=$AC_TIMER[1]
211 IF _REAL_MT==TRUE
212     GO G64 Z=_P2Z[_N]+3
213     GO G64 X=_XS Y=_YS
214     GO G60 G601 Z=_LZS
215 ELSE
216     GO G60 G601 X=_XS Y=_YS Z=_LZS
217 ENDIF
218 IF _TIME[0]<=_MINTIME[1]
219     _MINTIME[1]=_TIME[0]
220     _MINTIME[3]=$AC_TIMER[2]
221     GOTOF ("JUMP"<<_JUMPER)
222 ENDIF

```

```

223 CYCLE1END:
224 ;=====
225 JUMP1: _JUMPER=1 ; P1X Verschiebung in positiv
226 ;=====
227 _MINTIME[2]= _MINTIME[1] _Variable[0] = _Variable[0]+_JUMP
228 IF (_XS<_XZ)
229     IF _YA==_YB
230         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
231     ELSE
232         IF (_Variable[0]<=((_XA-_XB)/(_YA-_YB))*(_Variable[1]-_XA))+_YA-_CORR
233             )
234             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
235         ENDIF
236     ENDIF
237 ELSE
238     IF _Variable[0]<=_XS
239         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
240     ENDIF
241     _Variable[0] = _Variable[0]-_JUMP
242 ;=====
243 JUMP2: _JUMPER=2; P1X Verschiebung in negativ
244 ;=====
245 _Variable[0] = _Variable[0]-_JUMP
246 IF (_XS>_XZ)
247     IF _YA==_YB
248         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
249     ELSE
250         IF (_Variable[0]>=((_XA-_XB)/(_YA-_YB))*(_Variable[1]-_XA))+_YA-_CORR
251             )
252             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
253         ENDIF
254     ENDIF
255 ELSE
256     IF _Variable[0]>=_XS
257         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
258     ENDIF
259     _Variable[0] = _Variable[0]+_JUMP
260 ;=====
261 JUMP3: _JUMPER=3; P1Y Verschiebung in positiv
262 ;=====
263 _Variable[1] = _Variable[1]+_JUMP
264 IF (_YS<_YZ)
265     IF _YA==_YB
266         IF _Variable[1]<=_YA
267             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
268         ENDIF
269     ELSE
270         IF (_Variable[1]<=((_XA-_XB)/(_YA-_YB))*(_Variable[0]-_YA))+_XA-_CORR
271             )
272             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
273         ENDIF
274     ENDIF
275 ELSE
276     IF _Variable[1]<=_YS
277         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
278     ENDIF
279     _Variable[1] = _Variable[1]-_JUMP
280 ;=====
281 JUMP4: _JUMPER=4; P1Y Verschiebung in negativ
282 ;=====
283 _Variable[1] = _Variable[1]-_JUMP
284 IF (_YS>_YZ)
285     IF _YA==_YB
286         IF _Variable[1]>=_YA
287             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
288         ENDIF
289     ELSE
290         IF (_Variable[1]>=((_XA-_XB)/(_YA-_YB))*(_Variable[0]-_YA))+_XA-_CORR
291             )
292             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
293         ENDIF
294     ENDIF
295 ELSE
296     IF _Variable[1]>=_YS
297         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
298     ENDIF
299     _Variable[1] = _Variable[1]+_JUMP

```

```

300 ;=====
301 JUMP5: _JUMPER=5; P1Z Verschiebung in positiv
302 ;=====
303 _Variable[2] = _Variable[2]+_JUMP
304 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
305 _Variable[2] = _Variable[2]-_JUMP
306 ;=====
307 JUMP6: _JUMPER=6; P1Z Verschiebung in negativ
308 ;=====
309 _Variable[2] = _Variable[2]-_JUMP
310 IF _Variable[2]>=_PROBGEOALT
311 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
312 ENDIF
313 _Variable[2] = _Variable[2]+_JUMP
314 ;=====
315 JUMP7: _JUMPER=7; P2X Verschiebung in positiv
316 ;=====
317 _Variable[3] = _Variable[3]+_JUMP
318 IF (_XS>_XZ)
319 IF _YC==_YD
320 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
321 ELSE
322 IF (_Variable[3]<=((_XC-_XD)/(_YC-_YD)*(_Variable[4]-_XC))+_YC-_CORR
323 )
324 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
325 ENDIF
326 ELSE
327 IF _Variable[3]<=_XZ
328 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
329 ENDIF
330 ENDIF
331 _Variable[3] = _Variable[3]-_JUMP
332 ;=====
333 JUMP8: _JUMPER=8; P2X Verschiebung in negativ
334 ;=====
335 _Variable[3] = _Variable[3]-_JUMP
336 IF (_XS<_XZ)
337 IF _YC==_YD
338 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
339 ELSE
340 IF (_Variable[3]>=((_XC-_XD)/(_YC-_YD)*(_Variable[4]-_XC))+_YC-_CORR
341 )
342 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
343 ENDIF
344 ELSE
345 IF _Variable[3]>=_XZ
346 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
347 ENDIF
348 ENDIF
349 _Variable[3] = _Variable[3]+_JUMP
350 ;=====
351 JUMP9: _JUMPER=9; P2Y Verschiebung in positiv
352 ;=====
353 _Variable[4] = _Variable[4]+_JUMP
354 IF (_YS>_YZ)
355 IF _YC==_YD
356 IF _Variable[4]<=_YC
357 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
358 ENDIF
359 ELSE
360 IF (_Variable[4]<=((_XC-_XD)/(_YC-_YD)*(_Variable[3]-_YC))+_XC-_CORR
361 )
362 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
363 ENDIF
364 ELSE
365 IF _Variable[4]<=_YZ
366 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
367 ENDIF
368 ENDIF
369 _Variable[4] = _Variable[4]-_JUMP
370 ;=====
371 JUMP10: _JUMPER=10; P2Y Verschiebung in negativ
372 ;=====
373 _Variable[4] = _Variable[4]-_JUMP
374 IF (_YS<_YZ)
375 IF _YC==_YD
376 IF _Variable[4]>=_YC
377 REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
378 ENDIF

```

```

379     ELSE
380         IF ( _Variable [4] >= (( _XC - _XD ) / ( _YC - _YD )) * ( _Variable [3] - _YC )) + _XC - _CORR
381             )
382             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
383         ENDIF
384     ELSE
385         IF _Variable [4] >= _YZ
386             REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
387         ENDIF
388     ENDIF
389     _Variable [4] = _Variable [4] + _JUMP
390     ;=====
391     JUMP11: _JUMPER=11; P2Z Verschiebung in positiv
392     ;=====
393     _Variable [5] = _Variable [5] + _JUMP
394     REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
395     _Variable [5] = _Variable [5] - _JUMP
396     ;=====
397     JUMP12: _JUMPER=12; P2Z Verschiebung in negativ
398     ;=====
399     _Variable [5] = _Variable [5] - _JUMP
400     IF _Variable [5] >= PROBGE0ALT
401         REPEAT CYCLE1 CYCLE1END
402     ENDIF
403     _Variable [5] = _Variable [5] + _JUMP
404     ;=====
405     ; Erweiterte Protokollierung/ Debugging:
406     ;=====
407     IF _DEBUG==TRUE
408         WRITE( _ERROR, "HILLCLIMBPROT", "P1X=" << _Variable [0] << ", P1Y=" << _Variable
409             [1] << " P1Z=" << _Variable [2] << ", P2X=" << _Variable [3] << ", P2Y=" <<
410             _Variable [4] << " P2Z=" << _Variable [5] << " Zeit:" << _MINTIME [1])
411         R410=_Variable [0] R411=_Variable [1] R412=_Variable [2] R413=_Variable [3]
412         R414=_Variable [4] R415=_Variable [5] R416=_MINTIME [1]
413     ENDIF
414     ;=====
415     ; Rücksprung, falls besserer Punkt gefunden:
416     ;=====
417     IF _MINTIME [1] < _MINTIME [2]
418         GOTOB JUMP1
419     ENDIF
420     ;=====
421     ; Prüfung, ob Abbruchkriterium erreicht:
422     ;=====
423     IF _JUMP >= _JUMPEND
424         GOTOB JUMPO
425     ENDIF
426     ;=====
427     ; Protokollierung des besten Punktepaars:
428     ;=====
429     WRITE( _ERROR, "HILLCLIMBPROT", "-----")
430     WRITE( _ERROR, "HILLCLIMBPROT", "P1X=" << ROUND( _Variable [0] ) << " P1Y=" << ROUND(
431         _Variable [1] ) << " P1Z=" << ROUND( _Variable [2] ) << " P2X=" << ROUND( _Variable [3] )
432         << " P2Y=" << ROUND( _Variable [4] ) << " P2Z=" << ROUND( _Variable [5] ) << " => Zeit:" <<
433         _MINTIME [1] << " sek. (" << _MINTIME [3] << ")")
434     WRITE( _ERROR, "HILLCLIMBPROT", "-----")
435     IF _REAL_MT== FALSE
436         WRITE( _ERROR, "HILLCLIMBPROT", "Geschätzte Ausführungsdauer an echter WZM:
437             " << ROUND( $AC_TIMER [3] ) << " sek.")
438     ENDIF
439     WRITE( _ERROR, "HILLCLIMBPROT", "-----ENDE-----")
440     WHILE TRUE
441         MSG("Optimum gefunden: " << _MINTIME [3] << " sek.")
442         MO
443     ENDWHILE
444     RET

```

Literaturverzeichnis

- Abele u.a. 2011 Abele, E; Rost, R; Holland, L; Versch, A. 2011.
Integrierter Direktantrieb in Werkzeugwechslern mit Doppelarmgreifer.
VDI-Z Integrierte Produktion **153**(9), S. 56-59.
ISSN 0042-1766
- Abele u.a. 2012 Abele, E; Rost, R; Klöckner, B. 2012.
Elektromechanische Verriegelung von Greifersystemen
VDI-Z Integrierte Produktion **154**(10), S. 87-90.
ISSN 0042-1766
- AMB 2014 AMB - Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung. 2014.
Automobilindustrie fordert mehr Flexibilität.
zuletzt geprüft am 22.01.2015
Verfügbar: <http://www.messe-stuttgart.de/amb/journalisten/>
- Bahmann 2013 Bahmann, Werner. 2013.
Werkzeugmaschinen kompakt
21. Auflage
Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag
ISBN 978-3-658-03747-5
- Bauer 2011 Bauer, Walter. 2011.
Bohren und rückseitig Interpolationsanfassen.
VDI-Z Integrierte Produktion **153**(Special Werkzeuge), S. 21.
ISSN 0042-1766
- Ben-Daya u.a. 2009 Ben-Daya, M; Duffuaa, S; Raouf, A; Knezevic, J; Ait-Kadi, D. 2009.
Handbook of Maintenance Management and Engineering.
1. Auflage
London: Springer Verlag
ISBN 978-1-84882-471-3

- Bosch 2014 Bosch, Thomas. 2014.
*DE102014004654 Verfahren zum Bestimmen einer Bearbeitungs-
reihenfolge für ein spanend zu bearbeitendes Werkstück.*
Daimler AG
- Bosch 2015 Bosch, Thomas. 2015.
DE102015000291 Verfahren zur Steuerung einer Bearbeitungsmaschine.
Daimler AG
- Bosch und Heim 2014 Bosch, Thomas und Heim, Jochen. 2014.
DE102013021653 Verfahren zur Steuerung einer Bearbeitungsmaschine.
Daimler AG
- Bosch u.a. 2015 Bosch, Thomas et. al. 2015.
Zerspanprozesse effizienter machen.
wt Werkstattstechnik online **105**(5), S. 301-306.
ISSN 1436-4980
- Bosch Rexroth 2004 Bosch Rexroth AG. 2004.
Rexroth IndraMotion MTX 13VRS
Maschinenparameter: Parameterbeschreibung.
zuletzt geprüft am 03.04.2013
Verfügbar: <https://www.boschrexroth.com>
- Bosch Rexroth 2010a Bosch Rexroth AG. 2010.
*IndraMotion MTX - Die CNC-Systemlösung für perfektes Zerspanen.
und Umformen.* 20.08.2010
zuletzt geprüft am 15.01.2015
Verfügbar: <https://www.boschrexroth.com>
- Bosch Rexroth 2010b Bosch Rexroth AG. 2010.
Rexroth IndraMotion MTX 11VRS
Inbetriebnahme: Inbetriebnahmeanleitung. 28.07.2010
zuletzt geprüft am 15.01.2015
Verfügbar: <https://www.boschrexroth.com>
- Bosch Rexroth 2010c Bosch Rexroth AG. 2010.
Rexroth IndraMotion MTX 11VRS
Programmierhandbuch. 20.07.2010
zuletzt geprüft am 14.01.2015
Verfügbar: <https://www.boschrexroth.com>

-
- Bosch Rexroth 2011 Bosch Rexroth AG. 2011.
Rexroth IndraMotion MTX 11VRS
Funktionsbeschreibung: Anwendungsbeschreibung. 24.05.2011
zuletzt geprüft am 15.01.2015
Verfügbar: <https://www.boschrexroth.com>
- Bosch Rexroth 2015 Bosch Rexroth AG. 2015.
IndraMotion MTX performance: Bis zu 64 Achsen. 22.04.2015
zuletzt geprüft am 16.05.2015
Verfügbar: <https://www.boschrexroth.com>
- Brecher 2010 Brecher, Christian. 2010.
Ressourceneffiziente Maschinen und Anlagen im Fokus der Forschung.
wt Werkstattstechnik online **100**(5), S. 337.
ISSN 1436-4980
- CGTech 2015 CGTech Deutschland GmbH. 2015.
VERICUT Modul: Machine Simulation.
Zugriff: 27.01.2015
Verfügbar: <http://www.cgtech.de/products/about-vericut/machine-simulation/>
- Chen und Zhong 2010 Chen, J. und Zhong, T. 2010.
A Hybrid-Coded Genetic Algorithm Based Optimisation of
Non-Productive Paths in CNC Machining.
The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
2002(20), S. 163-168.
DOI 10.1007/s001700200139
- CHIRON-Werke 2015 CHIRON-Werke GmbH & CO. KG. 2015.
Der CHIRON Werkzeugwechsel.
zuletzt geprüft am 22.01.2015
Verfügbar: <http://www.chiron.de/>
- Denkena 2013 Denkena, Berend. 2013.
*NC-Code Optimizer - Automatisierte Optimierung für mehrachsige
Werkzeugmaschinen: Projektabschlussbericht.* 10.04.2013
zuletzt geprüft am 07.05.2015
Verfügbar: <http://www.ifw.uni-hannover.de/ifw-publikationen.html>

- DIN 1975 Deutsches Institut für Normung. 1975.
DIN 66217 1975-12: Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen.
Berlin: DIN
- DIN 1983 Deutsches Institut für Normung. 1983.
DIN 66025 Teil 1 1983-01: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen.
Berlin: DIN
- DIN 1988 Deutsches Institut für Normung. 1988.
DIN 66025 Teil 2 1988-09: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen.
Berlin: DIN
- Fanuc 2010a Fanuc Ltd. 2010.
Fanuc Series 30i-PB: Operator's Manual. 12.11.2010
zuletzt geprüft am 12.08.2015
Verfügbar: <http://www.fanuc.eu>
- Fanuc 2010b Fanuc Ltd. 2010.
C Language Executor: Programming Manual. 22.09.2010
zuletzt geprüft am 21.04.2015
Verfügbar: <http://www.fanuc.eu>
- Fanuc 2015 Fanuc Ltd. 2015.
Fanuc News 2014-III. 02.02.2015
zuletzt geprüft am 01.07.2015
Verfügbar: <http://www.fanuc.eu>
- Glöckler 2014 Glöckler, Michael. 2014.
Simulation mechatronischer Systeme.
1. Auflage
Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag
ISBN 978-3-658-05384-0
- GROB-Werke 2011 GROB-Werke GmbH & Co. KG. 2011.
GROB G550: Technische Beschreibung. 23.12.2011

-
- GROB-Werke 2015 GROB-Werke GmbH & Co. KG. 2015.
Modularität bringt Vorteile. 22.01.2015
zuletzt geprüft am 27.03.2015
Verfügbar: <http://www.grobgroup.com>
- Grötschel 2015 Grötschel, Martin. 2015.
Schnelle Rundreisen: Das Travelling-Salesman-Problem
In: Lutz-Westphal, Brigitte: *Diskrete Mathematik erleben.*
2. Auflage
Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 95-128.
ISBN 978-3-658-06992-6
- Heidenhain 2014 Dr. Johannes Heidenhain GmbH. 2014
LAC erhöht Genauigkeit und spart Zeit.
Heidenhain Klartext **2014**(60), S. 18-19
- Heisel u.a. 2014 Heisel, U.; Göhner, P.; Bader, A.; Rauscher, M. 2014.
Effektivität in der Powertrain-Fertigung steigern
wt Werkstattstechnik online **104**(1/2), S. 89-96.
ISSN 1436-4980
- Heistermann 1994 Heistermann, Jochen. 1994.
Genetische Algorithmen.
1. Auflage
Stuttgart: Teubner Verlag
Teubner-Texte der Informatik. Band 9.
ISBN 978-3-322-99633-6
- Hirsch und
Hellmich 2012 Hirsch, Andreas und Hellmich, Arvid. 2012.
Aufbau und Auslegung funktionsbestimmender
Werkzeugmaschinen-Baugruppen.
In: Neugebauer, Reimund: *Werkzeugmaschinen.*
1. Auflage
Berlin: Springer Vieweg Verlag, S. 289-461.
ISBN 978-3-642-30077-6
- Hoffmann 2015 Hoffmann GmbH 2015.
Hohes Zeitspannvolumen bei geringem Verschleiß. 15.01.2015
zuletzt geprüft am 15.01.2015
Verfügbar: <http://www.hoffmann-group.com>

- Hüller Hille 2004 Hüller Hille GmbH. 2004.
BAZ mit paralleler Koppelkinematik für die Großserienfertigung.
15.01.2015
zuletzt geprüft am 15.01.2015
Verfügbar: <http://www.mav-online.de>
- ISG 2014 ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH. 2014.
ISG Virtuos Handout. 02.02.2015
zuletzt geprüft am 02.07.2015
Verfügbar: <http://www.isg-stuttgart.de>
- ISO 2009 International Organization for Standardization
ISO 6983-1 2009-12:
Automation systems and integration - Numerical control of machines
Program format and definitions of address words.
Genf: ISO
- Karpuschewski u.a. 2011 Karpuschewski, B; Kalhöfer, E; Rief, M. 2011.
Zeit und Energie sparen mit Stufenbohren.
VDI-Z Integrierte Produktion **153**(5), S. 14-16.
ISSN 0042-1766
- Kim 2001 Kim, Taejung. 2001.
Time-optimal CNC tool paths: A mathematical model of machining.
Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation.
- Kumar u.a. 2014 Kumar, S; Gupta, A; Chandna P. 2014.
Minimization of Non-Productive Time during 2.5D Milling.
International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and
Mechatronics Engineering **8**(6), S. 1151-1156.
ISSN 2010-3778
- Mahnke u.a. 2009 Mahnke, W; Leitner, S; Damm, M. 2009.
OPC Unified Architecture.
1. Auflage
Berlin: Springer Verlag
ISBN 978-3-540-68898-3
- Malakye 2010 Malakye - Broadsan Technologies, Inc. 2010.
GoPro with Founder/Inventor Nick Woodman.
zuletzt geprüft am 09.01.2015
Verfügbar: <http://www.malakye.com>

-
- Mastercam 2015 Mastercam - InterCAM-Deutschland GmbH. 2015.
Fräsen - 2D-Werkzeugwege.
zuletzt geprüft am 19.01.2015
Verfügbar: <http://www.mastercam.de>
- Matai u.a. 2010 Matai, R; Singh, S; Mittal, M. 2010.
Traveling Salesman Problem:
An Overview of Applications, Formulations and Solution Approaches.
In: Davendra, Donald: *Travelling Salesman Problem.*
Rijeka: InTech Open
ISBN 978-953-307-426-9
- Montiel-Ross u.a. 2012 Montiel-Ross, O; Medina-Rodríguez, N; Sepúlveda, R; Melin, P. 2012.
Methodology to Optimize Manufacturing Time for a CNC
Using a High Performance Implementation of ACO.
International Journal of Advanced Robotic Systems **9**, S. 1-10.
DOI 10.5772/50527
- Mößmer u.a. 2007 Mößmer, H. E; Schedlbauer, M; Günthner, W. A. 2007.
Die automobile Welt im Umbruch.
In: Günther, Willibald: *Neue Wege in der Automobillogistik.*
1. Auflage
Berlin: Springer Verlag, S. 3-15.
ISBN 978-3-540-72404-9
- OPENMIND 2015 OPEN MIND Technologies AG. 2015.
Sicher ist sicher!
zuletzt geprüft am 27.01.2015
Verfügbar: <http://www.openmind-tech.com>
- REFA 1993 REFA, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung e. V. 1993.
Methodenlehre der Betriebsorganisation:
Lexikon der Betriebsorganisation.
1. Auflage
München: Carl Hanser Verlag
ISBN 3-446-17523-7
- Ruzic 2013 Ruzic, Lars. 2013.
Bosch zieht Fertigung aus Hildesheim ab.
In: *Hannoversche Allgemeine Zeitung.* 21.10.2013
zuletzt geprüft am 22.06.2015
Verfügbar: <http://www.haz.de>

- Salinas und
Klemm 2009 Salinas, Leticia und Klemm, Peter. 2009.
Plattform zur Optimierung und Erprobung technischer
Fertigungssoftware.
wt Werkstattstechnik online **99**(5), S. 336-342.
ISSN 1436-4980
- saveab 2013 saveab GmbH. 2013.
Über uns.
zuletzt geprüft am 26.01.2015
Verfügbar: <http://www.saveab.com>
- Schäfer 2015 Schäfer, Daniel. 2015.
Lean-Informationstechnik im Finanzdienstleistungssektor
1. Auflage
Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag
ISBN 978-3-658-06988-9
- Schiffler 2011 Schiffler, Ralph. 2011.
Direktantriebstechnik etabliert sich "mit hoher Dynamik".
VDI-Z Integrierte Produktion **153**(9), S. 24-36.
ISSN 0042-1766
- Schröder 2007 Schröder, Thomas. 2007.
*Entwicklung und Evaluation von Algorithmen zur zeitoptimierten
Bewegungszерlegung bei kinematisch redundanten Werkzeugmaschinen.*
Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation.
- Siemens 2000a Siemens AG. 2000.
Hilfe für BTSS-Variablen für SINUMERIK 810D, 840D, FM-NC.
01.05.2000
zuletzt geprüft am 07.05.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2000b Siemens AG. 2000.
PROFInet OPC-Server: Produktionformation. 07.08.2001
zuletzt geprüft am 04.07.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>

-
- Siemens 2008 Siemens AG. 2008.
Sinumerik 840D sl/840D/840Di sl - Zyklen: Programmierhandbuch.
01.01.2008
zuletzt geprüft am 01.04.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2010a Siemens AG. 2010.
Sinumerik 840D sl / 828D Grundfunktionen: Funktionshandbuch.
01.03.2010
zuletzt geprüft am 08.08.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2010b Siemens AG. 2010.
Sinumerik 840D sl Ausführliche Maschinendaten Beschreibung: Listenhandbuch. 01.03.2010
zuletzt geprüft am 07.05.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2011 Siemens AG. 2011.
Siemens Sinumerik Virtual NC Controller Kernel: Integrated validation of machining operations with full machine tool motion.
zuletzt geprüft am 08.04.2011
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2013a Siemens AG. 2013.
Sinumerik 840D sl / 828D Arbeitsvorbereitung: Programmierhandbuch.
01.03.2013
zuletzt geprüft am 22.04.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2013b Siemens AG. 2013.
Sinumerik 840D sl / 828D Basesoftware und Bedien-Software: Inbetriebnahmehandbuch. 01.03.2013
zuletzt geprüft am 09.06.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2013c Siemens AG. 2013.
Sinumerik 840D sl / 828D Grundlagen: Programmierhandbuch.
01.03.2013
zuletzt geprüft am 27.03.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>

- Siemens 2013d Siemens AG. 2013.
Sinumerik 840D sl/ 828D Sonderfunktionen: Funktionshandbuch.
01.03.2013
zuletzt geprüft am 07.03.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2013e Siemens AG. 2013.
Sinumerik 840D sl/ 828D Synchronaktionen: Funktionshandbuch.
01.03.2013
zuletzt geprüft am 17.07.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2013f Siemens AG. 2013.
*Sinumerik 840D sl Inbetriebnahme CNC: NC, PLC, Antrieb:
Inbetriebnahmehandbuch.* 01.03.2013
zuletzt geprüft am 04.11.2014
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2015a Siemens AG. 2015.
Compile Cycles: Overview.
zuletzt geprüft am 17.02.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2015b Siemens AG. 2015.
RealNC: NC Simulation and Optimization.
zuletzt geprüft am 30.01.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Siemens 2015c Siemens AG. 2015.
Tecnomatix Machine Configurator.
zuletzt geprüft am 30.03.2015
Verfügbar: <http://www.siemens.com>
- Singh u.a. 2010 Singh, R; Tiwari, A; Kulkarni, M; Rao, P. 2010.
An Expert System for Selecting Accessories for Lean Machine Tools.
In: Huang, George et al: *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored
International Conference on Digital Enterprise Technology.*
Berlin: Springer Verlag, S. 569-580.
Band 66
ISBN 978-3-642-10429-9

-
- SolidCAM 2014 SolidCAM GmbH. 2014.
Neue Funktionen in SolidCAM 2014.
zuletzt geprüft am 30.04.2015
Verfügbar: <http://www.solidcam.de>
- Syska 2006 Syska, Andreas. 2006.
Produktionsmanagement.
Wiesbaden: Gabler Verlag
ISBN 978-3-8349-0235-1
- Törnig 1979 Törnig, Willi. 1979.
*Numerische Mathematik für Ingenieure und Physiker:
Eigenwertprobleme und numerische Methoden der Analysis.*
1. Auflage
Berlin: Springer Verlag
ISBN 978-3-642-96523-4
- Trumpf 2015 Trumpf GmbH + Co. KG. 2015.
Höchste Dynamik durch Kohlefaser Leichtbau-Konstruktion.
zuletzt geprüft am 22.01.2015
Verfügbar: <http://www.trumpf.com>
- Uhlmann 2011 Uhlmann, Eckart. 2011.
Hochtechnologie und industrielle Dienstleistungen.
wt Werkstattstechnik online **101**(7/8), S. 458.
ISSN 1436-4980
- VDI 2011 Verein deutscher Ingenieure
VDI 3423 2011-08: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen
Düsseldorf: VDI
- Wabner u.a. 2014 Wabner, M; Frieß, U; Hofmann, S; Hellmich, A; Quellmalz, J. 2014.
Optimierte Inbetriebnahme durch Simulation.
wt Werkstattstechnik online **104**(1/2), S. 97-99.
ISSN 1436-4980.
- Wannenwetsch 2004 Wannenwetsch, Helmut. 2004.
Erfolgreiche Verhandlungsführung in Einkauf und Logistik.
1. Auflage
Berlin: Springer Verlag
ISBN 978-3-662-07077-2

- Weck 1998 Weck, Manfred. 1998.
*Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 1:
Maschinenarten und Anwendungsbereiche.*
5. Auflage
Berlin: Springer Verlag
ISBN 978-3-662-10919-9
- Weck 2001 Weck, Manfred. 2001.
*Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme 4:
Automatisierung von Maschinen und Anlagen.*
5. Auflage
Berlin: Springer Verlag
ISBN 978-3-662-10925-0
- Weyrich u.a. 2010 Weyrich, M; Cai, J; Berger, U. 2010.
Standardization of machining process planning
in powertrain production using a CAD-based IT-tool.
In: Camarinha-Matos, Luis et al: *Processes and Foundations for
Virtual Organizations.*
New York: Springer Science + Business Media, S. 379-388.
ISBN 978-1-4757-6295-2
- Williams 2005 Williams, Paul. 2005.
Models for Solving the Travelling Salesman Problem.
In: Camarinha-Matos, Luis et al: *Integration of AI and OR Techniques
in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems.*
Berlin: Springer Verlag, S. 17-18.
ISBN 978-3-540-26152-0
- z-optimations 2015 z-optimations GmbH. 2015.
Was tun wir?.
zuletzt geprüft am 26.01.2015
Verfügbar: <http://www.z-opti.com>
- Züst 1991 Züst, Rainer. 1991.
Grundlagen der Prozessplanung.
Wahlfachvorlesung der Abteilung IIIIE, ETH Zürich
zuletzt geprüft am 24.11.2014

Die Effizienz von Fertigungsprozessen kann durch die Reduktion technischer Nebenzeiten deutlich gesteigert werden. Hierzu wird eine Methode vorgestellt, welche die äußerst komplexe Aufgabe der Optimierung des Fertigungsprozesses vereinfachen kann. Die Methode besteht aus Verfahren der Potenzialanalyse und der Optimierung. Diese Verfahren werden anschließend exemplarisch an Fertigungsprozessen der automobilen Großserienfertigung angewandt und die daraus resultierenden Erfolge aufgezeigt.

ISBN 978-3-8396-1093-0



FRAUNHOFER VERLAG