

Modellbasierte Werkstück- und Werkzeugpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit in NC-Programmen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFTEN

(Dr. rer. pol.)

der Fakultät Wirtschaftswissenschaften
der Universität Paderborn

vorgelegte
DISSERTATION

von
M. Sc. Jens Weber
Paderborn

Tag des Kolloquiums:

19. Dezember 2017

Referent:

Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier

Korreferent:

Prof. Dr. Leena Suhl

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. CIM am Heinz Nixdorf Institut im Rahmen des Forschungsprojekts InVorMA des BMBF-Spitzenclusters IT'S OWL entstanden.

In erster Linie möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier für die Möglichkeit zur Promotion und die damit verbundene Betreuung bedanken. Als mein Doktorvater wurde mir immer eine offene Tür angeboten und mir die richtigen lenkenden Impulse für das Gelingen meiner Arbeit auf den Weg gegeben. Zudem danke ich Frau Prof. Dr. Leena Suhl für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie den Mitgliedern meiner Promotionskommission, Herrn Prof. Dr. Stefan Betz und Frau Jun.-Prof. Dr. phil. habil. Michaela Geierhos.

Prof. Dr. phil. habil. Michaela Geierhos danke ich zudem für ihr Feedback in allen wissenschaftlichen Fragen und Methoden. Zudem möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Christoph Laroque bedanken, der mir immer wertvolles Feedback bei den Forschungsprojekten sowie bei der Organisation von wissenschaftlichen Veröffentlichungen gab.

Ich möchte mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen Annette Steffens, Frederik Bäumer, Stephan Abke, Akin Akbulut, Niclas Rempe, Nicolai Grote, Markus Dollmann und Dr. Nina Seemann für die zahlreichen anregenden und sowohl fachlichen als auch nicht-fachlichen Diskussionen bedanken. Die Gespräche waren immer mit einer guten Portion Humor begleitet, der die Zeit am HNI unvergesslich machte. Ferner möchten ich den studentischen Hilfskräften André Mueß, Hüseyin Aygün, Benjamin Bellgrau, Frédéric Salmen und Mehmet Emin Özkan für die tatkräftige Unterstützung bei den Projekten sowie bei meiner Lehrtätigkeit danken. Ebenfalls danke ich Dr. Simon Boxnick, Dr. Jan-Patrick Pater, Dr. Sebastian Lauck, Dr. Alexander Klaas, Lukas Kopecki und Sabine Schulze für die gemeinsame Zeit am HNI. Durch die Kolleginnen und Kollegen durfte ich eine sehr angenehme Arbeitsatmosphäre genießen und es entstanden Freundschaften, die mich bereichern.

Für die große Unterstützung im Umgang mit Versuchsanlagen im Labor möchte ich meinen Dank Alexander Pöhler und Jörg Schaffrath aussprechen. Ohne sie wären die notwendigen Experimente nicht durchführbar gewesen. Für die IT-technische Unterstützung geht mein Dank an Klaus Wittemeier und Hannah Schraven. Auch möchte ich mich im Rahmen des Projekts InVorMa für die wertvolle Zusammenarbeit auch in Zeiten intensiver Entwicklungsarbeit, bei der stets eine humorvolle Atmosphäre herrschte, bedanken, allen voran Dr. Benjamin Jurke, Raphael-Elias Reisch, Florian Isenberg und Gerald Rehage. Auch richtet sich mein Dank an die Praxispartner *Strothmann Machines and Handling GmbH*, *Phönix Contact GmbH & Co. KG* und der *DMG Mori AG*.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich für die Ermutigung und Unterstützung bei allen meinen Vorhaben. Mein besonderer Dank geht an meine Frau Rebecca. Sie hat viel auf sich genommen und auch verzichtet, um mich diese Arbeit verfassen zu lassen. Sie war immer geduldig und nahm weite Strecken auf sich, um mir jederzeit einen starken Rückhalt zu gewährleisten, mich zu ermutigen und zu motivieren.

Zusammenfassung

Durch neuartige Antriebskonzepte, Werkzeuge mit guten Materialeigenschaften, präzise Spindelführungen sowie leistungsstarke Steuerungen stößt die technische Verbesserung von Werkzeugmaschinen an ihre Grenzen. Zeiteinsparungen durch eine verringerte Hauptzeit sind marginal, sodass nur noch die Verringerung der Nebenzeiten, insb. die Anteile, die die Maschineneinrichtung betreffen, das Potenzial für eine signifikante Fertigungszeitreduzierung bietet. Dies erfordert Handlungsmaßnahmen im Rahmen der Arbeitsplanung und -vorbereitung. Durch Werkzeugmaschinensimulationen werden in der heutigen Zeit Fertigungsszenarien inklusive NC-Programme validiert. Dabei stehen die Kollisionsprüfung, der Materialabtrag sowie das Verhalten der Steuerung im Fokus. Die Simulation übernimmt hierbei nicht die gezielte Verbesserung der Maschineneinrichtung als solche und ist insbesondere für eine Überprüfung einer hohen Anzahl an alternativen Werkstückpositionen ungeeignet. Auch werden NC-Programme und deren Güte in diesem Zusammenhang nicht hinreichend geprüft, bewertet und im gleichen Zuge auch angepasst. Durch variierende Werkstückpositionen können jedoch umständliche Werkzeugpfade, Rücklauf-, Anhebe- und Zustellzeiten, die Teile der Zykluszeit und damit der Fertigungszeit ausmachen, proaktiv verringert werden, was zudem ein kollisionsfreies Fertigen ermöglicht. Auch finden in der Simulationsumgebung eine Werkzeugpositionierung im Werkzeugmagazin sowie deren Überprüfung in Bezug auf Zeiteinsparpotenzial bei Werkzeugwechselprozessen nur wenig Beachtung.

Die vorliegende Arbeit behandelt ein Verfahren zur automatisierten Generierung von alternativen Werkstück- und Werkzeugpositionen in der Simulationsumgebung und die damit einhergehende simulationsgestützte Überprüfung und NC-Programmanpassung. Ziel ist es, einen Bestand an zykluszeitreduzierenden Werkstückpositionen zu erhalten, die gleichzeitig zu einer kollisionsfreien Fertigung führen, um dem Planer zeitintensive Einzelüberprüfungen zu ersparen. Für eine Reduzierung der Werkzeugwechselzeit und Vermeidung ungünstiger Werkzeugpositionen im Magazin wird ferner ein Modell vorgeschlagen, das durch sinnvolle Magazinstartbelegungen die Werkzeugmagazinrotationszeit und damit die Werkzeugwechselzeit in Abhängigkeit von dem NC-Programm und der Magazineinrichtarbeit verringert. Gesteuert werden diese Ansätze durch eine durchgängige Benutzerschnittstelle.

Abstract

Through the development of new drive concepts, tools with good material properties, precision spindle guidance as well as powerful control systems technical improvements of tooling machines are reaching their limit. Time savings through decreased main production times are marginal, so that only the reduction of non-productive times offers the potential for significant production time reduction, esp. the related time savings during machine setup times. This requires actions within the scope of work planning and preparation. Today, production scenarios including NC programs are validated using tooling machine simulation. The focus is on collision detection, material removal and the behavior of the control system. The simulation does not use a targeted approach as such for improving the machine setup and it is not suitable for the validation of a high number of alternative workpiece positions. In this context, NC-programs and their quality are also not sufficiently investigated, assessed and adjusted at the same time. Through varying workpiece positions, circuitous tool paths, return times, lift times and the positioning times which are parts of the cycle time and therefore also production time can be reduced proactively. Tool positioning in the tool magazine and the review for potential time savings during tool change processes receive less attention in the simulation environment.

The dissertation focuses on developing a procedure to automatically generate alternative workpiece and tool positions in a tooling machine simulation environment and the associated simulation-based validation of production and NC program adjustments. The goal is to attain a pool of workpiece position setup data automatically, leading to reduced cycle times. The generated setup data leads simultaneously to collision-free production. Thus, time-consuming individual validation processes can be avoided. In order to reduce tool change time as well as prevent inconvenient tool positions in the magazine a model is additionally suggested to minimize tool magazine rotation time as well as the tool change process time depending on NC-programs and tool magazine setup working-time. The approaches are usable and controllable by a seamless user interface.

Modellbasierte Werkstück- und Werkzeugpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit in NC-Programmen

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Defizite bei der NC-Programmierung und -überprüfung	3
2.1	Zykluszeitreduzierende Werkstückpositionierung	5
2.1.1	Grenzen bei der Darstellung von Fertigungsverfahren nach der Werkstückpositionierung durch Simulation als Testumgebung.....	7
2.1.2	Grenzen bei der Überprüfung der NC-Programme	8
2.1.3	Grenzen bei der rechnergestützten Anpassung der NC-Programme	12
2.1.4	Anforderung an eine Methode zur Werkstückpositionierung.....	15
2.2	Zykluszeitreduzierende Werkzeugpositionierung.....	17
2.2.1	Grenzen bei der Darstellung der Werkzeugpositionierung durch Simulation als Testumgebung.....	18
2.2.2	Grenzen bei der Überprüfung der Werkzeugpositionierung.....	18
2.2.3	Grenzen bei der rechnergestützten Anpassung der Werkzeugpositionierung	20
2.2.4	Anforderungen an eine Methode zur Werkzeugpositionierung	22
2.3	Benutzerschnittstelle.....	25
2.3.1	Grenzen bei der durchgängigen Lösung einer Schnittstelle.....	25
2.3.2	Anforderungen an die Benutzerschnittstelle	27
3	Stand der Technik.....	29
3.1	Werkstückpositionierung.....	29
3.1.1	Werkzeug für die Werkstückpositionierung.....	29
3.1.2	Testumgebung für NC-Programme.....	33
3.1.2.1	Grundlagen NC-Steuerung.....	35
3.1.2.2	Grafische Simulation von NC-Programmen.....	39
3.1.2.3	Simulation der NC-Programme durch virtuelle Werkzeug- maschinen	40
3.1.3	Virtuelle Werkzeugmaschine	45

3.1.3.1	Bedienung der virtuellen Werkzeugmaschine	46
3.1.3.2	Einrichtprozess der virtuellen Werkzeugmaschine	48
3.1.3.3	Rückmeldung und Darstellung der Simulationsergebnisse	50
3.2	Werkzeugpositionierung	54
3.2.1	Werkzeug für die Werkzeugpositionierung	54
3.2.2	Werkzeugmagazin und Werkzeugwechselkonzepte.....	61
3.2.3	Standzeitüberwachung von Werkzeugen.....	63
3.3	Benutzerschnittstelle.....	68
4	Zu leistende Arbeit.....	73
4.1	Modellbasierte Werkstückpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit auf Basis realer NC-Programme	73
4.2	Werkzeugpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit auf Basis realer NC-Programme.....	75
4.3	Erstellung und Erprobung von Benutzerschnittstellen für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung	78
5	Konzept.....	79
5.1	Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkstückpositionierung	79
5.1.1	Die erweiterte Zykluszeit.....	79
5.1.2	Such- und Prüfverfahren zur proaktiven Werkstückpositionierung zur Reduzierung der erweiterten Zykluszeit.....	84
5.1.2.1	Erweiterung der Methode zur proaktiven Identifizierung der Werkstückpositionierung.....	87
5.1.2.2	Mehrphasiger Ansatz zur Werkstückpositionierung.....	95
5.1.2.3	Erweiterung des Ansatzes zur Überprüfung und Verbesserung der Werkstückpositionierung	100
5.1.3	Kritische Bewertung und Grenzen der Werkstückpositionierung	108
5.1.4	Gütekriterien zur Beurteilung der Aufspannsituation und Auswirkung auf das NC-Programm	110
5.2	Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkzeugpositionierung.....	111
5.2.1	Modellierung und Annahmen zum Werkzeugmagazin.....	111
5.2.2	Erstellung eines MWZW nach Vorbild einer realen Werkzeugmaschine	113
5.2.2.1	Optimierung der Werkzeugpositionierung mithilfe des GA	113
5.2.2.2	Prozesse des MWZW.....	114

5.2.2.3	Einzelprozesse verschiedener Werkzeugwechselsituationen	117
5.2.2.4	Erfassung und Berechnung von Prozesszeiten anhand einer realen Maschine	119
5.2.3	Verwerfungsstrategien zur Auswahl der auszuwechselnden Werkzeuge	123
5.2.4	Bewertungsfunktion für die Werkzeugpositionierung, basierend auf NC-Programmbefehlen	124
5.2.5	Werkzeugpositionierungsstrategie	127
5.2.6	Kritische Bewertung des MWZW	128
5.2.7	Formales Optimierungsmodell für eine Werkzeugpositionierung	129
5.2.8	Modellerweiterung zur Berücksichtigung der Standzeit und Reststandzeit von Werkzeugen.....	132
5.2.8.1	Standzeitadäquates Arbeiten beim <i>Drehen</i>	134
5.2.8.2	Standzeitadäquates Arbeiten beim <i>Fräsen</i>	139
5.2.8.3	Standzeitadäquates Arbeiten beim <i>Bohren</i>	142
5.2.8.4	Umsetzungskonzept zur Überprüfung der Standzeiten auf Basis der NC-Programme.....	144
5.2.8.5	Kritische Bewertung zur Standzeitüberwachung der Werkzeuge	146
5.2.8.6	Datenerfassung von Fertigungsparametern zur Einhaltung der Standzeiten und nachhaltiger Werkstückpositionierung	147
6	Umsetzung der Konzepte anhand einer Benutzerschnittstelle	153
6.1	Schnittstellen zur Ansteuerung und Verwaltung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung	153
6.2	Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkstückpositionierung	157
6.2.1	Ansteuerung der virtuellen Werkzeugmaschine und Datenhaltung für die Werkstückpositionierung.....	157
6.2.1.1	Nutzung und Bedienung eines virtuellen Werkzeugmaschinenmodells	157
6.2.1.2	Datenhaltung für die Werkstückpositionierung	162
6.2.2	Identifikation der zykluszeitreduzierten Werkstückpositionierung bei realen NC Programmen	166
6.2.2.1	Analyse der Werkzeugwechselfade im Zusammenhang mit der Werkstückposition.....	196
6.2.2.2	Besonderheiten bei der Orientierungsänderung durch θ	200

6.2.2.3	Werkstückpositionierung bei Initialkoordinaten außerhalb des Tischzentrums.....	209
6.2.2.4	Bewertung anhand der Gütekriterien für die Werkstückpositionierung	211
6.3	Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkzeugpositionierung.....	212
6.3.1	Bestimmung der Werkzeugpositionen als Startbelegung.....	213
6.3.1.1	Eine reale Maschine als Modellgrundlage	213
6.3.1.2	Material und Werkstück.....	214
6.3.2	Identifikation der Werkzeugpositionierung durch das MWZW.....	214
6.3.2.1	Ausführung anhand eines realen NC-Programms.....	214
6.3.2.2	Ergebnis des MWZW für die Werkzeugpositionierung	215
6.3.3	Identifikation der Werkzeugpositionierung auf Basis eines linearen Optimierungsmodells	219
6.3.4	Vorabüberprüfung des NC-Programms für eine standzeitadäquaten Werkzeugpositionierung	222
7	Zusammenfassung	225
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Werkstück- und Werkzeugpositionierung	225
7.2	Grenzen der Arbeit	229
7.3	Weiterer Forschungsbedarf	231

Anhang

A1	Ergänzungen zur Werkstückpositionierung	237
A1.1	Optimierungsansatz durch unterschiedliche Konfiguration der Asynchronität des PSO-Algorithmus.....	237
A1.2	Konvergenzverhalten der ersten Phase des Aufspannverfahrens I	242
A1.3	Konfidenzanalyse der Metaheuristik	243
A1.4	Programmierwerkzeuge und Rechnereinrichtung	245
A1.5	Pseudocode der PSO und des K-Means-Algorithmus	246
A1.6	Ergänzung zum Datenbankmodell für die Werkstückpositionierung	246

A1.7	Schnittstelle auf XML-Basis	248
A1.8	Ergänzungen zur Kreisinterpolation bei Kreisendpunkt und Kreisradius	249
A2	Ergänzung zur Werkzeugpositionierung	255
A2.1	Messung und Versuchsdurchführung auf Basis der Span-zu-Span-Zeit	255
A2.2	Softwarewerkzeuge	256
A2.3	Reihenfolge der Werkzeuge aus dem NC-Programm <i>Schlittenplatte</i>	258
A2.4	Technische Daten der realen Maschine	259
A2.5	Pseudocode genetischer Algorithmus	262
A2.6	Startbelegungen der Werkzeugpositionierung	262
A3	Nachtrag und Ergänzung zur Onlineschnittstelle	267
A3.1	Kollaborations- und Kooperationssysteme	267
A3.2	Kollaboration und Einordnung von MSSP	268
A3.3	Exkurs	271

Abkürzungsverzeichnis¹

CAD	.....	Computer Aided Design
CAM	.....	Computer Aided Manufacturing
DIN	.....	Deutsches Institut für Normung
GA	.....	Genetischer Algorithmus
IKT	.....	Informations- und Kommunikationstechnologie
KMU	.....	Kleinere und mittlere Unternehmen
MS	.....	Microsoft ²
MSSP	.....	MS SharePoint
MWZW	.....	Modell des Werkzeugwechsels zur Werkzeugpositionierung
PSO	.....	Partikelschwarmoptimierung
VDI	.....	Verein Deutscher Ingenieure
VMDE	.....	Virtual Machine Data Exchange ³
VR	.....	Virtual Reality
vWZM	.....	virtuelle Werkzeugmaschine
XML	.....	Extensible Markup Language

¹ Auf eine Auflistung von Abkürzungen, die zwar in der Arbeit vorkommen aber allgemein bekannt sind, wurde im Abkürzungsverzeichnis verzichtet. Als allgemein bekannt sollen alle Abkürzungen gelten, die in [Dud96] aufgenommen sind.

² Microsoft Deutschland GmbH wurde 1983 gegründet und beinhaltet heute mehrere Geschäftsstellen. Die Microsoft Corporation wurde 1975 gegründet und hat seinen aktuellen Firmensitz in Redmont, USA. Microsoft beinhaltet u. a. die Produkte MS Office, MS SharePoint und das Betriebssystem Windows.

³ Das Datenformat VMDE wurde als Kommunikationsschnittstelle entwickelt und findet in den Softwareprodukten (vWZM) der Firma *DMG MORI AG* Einsatz (vgl. [DMG16-ol]).

Symbolverzeichnis

a	Beschleunigung [m/s ²]
a_e	Schnittbreite [mm]
a_p	Schnitttiefe [mm]
a_x	Beschleunigung bezogen auf die x-Achse [m/s ²]
a_y	Beschleunigung bezogen auf die y-Achse [m/s ²]
a_z	Beschleunigung bezogen auf die z-Achse [m/s ²]
A	Zerspanungsquerschnitt [mm ² /U]
b_i	Größe Werkzeug i
B	Arbeitseingriff spanende Bearbeitung
c_k	Clusteroid (Clustermittelpunkt) für eine Menge an Clustern
C	Schnittgeschwindigkeit bei einer Standzeit von 1 Minute [mm/min]
d	Durchmesser
d_{Aufnahme}	Durchmesser der Werkzeugaufnahme [mm]
D	Dimension
e	Konfidenzintervall
e_{jl}	Distanzmaß von Werkzeugplatz j und Werkzeugplatz l
E	Menge der Eingangsvektoren
E_{kin}	Kinetische Energie [J]
$E(\text{Fehler})$	Erwartungswert für Knotenausfälle
$E(\text{repariert})$	Erwartungswert für Wiederverfügbarkeit von Knoten
EZZ_{NC}	Erweiterte Zykluszeit
f	Funktion
f	Werkzeugvorschub pro Umdrehung [mm/U]
f_{faktor_1}	Einheitendimensionierungsfaktor
f_{faktor_2}	Einheitendimensionierungsfaktor
f_{ver}	Verfahrensfaktor
f_z	Vorschub pro Schneide (Zahn)

\vec{f}	Fitnessvektor
F_c	Schnittkraft beim Bohren [N]
g	Funktion
G_m	Generation m
$G_{Partikel}$	Partikelpopulation
h	Funktion
H_{G0}	Absolute Häufigkeit der linearen Bahninterpolation G0
$H_{F[Zahl]}$	Absolute Häufigkeit der Vorschubbefehle
I	Vektorkoordinate für das Kettenmaß
J	Vektorkoordinate für das Kettenmaß
k	Anzahl der Cluster und Maschineninstanzen
k_c	Spezifische Schnittkraft [N/mm ²]
K	Bewertungsfunktion für die Werkzeugpositionierung
$K_{Beschaffung}$	Faktor zur Messung und Bewertung der Beschaffung von Werkzeugen
K_I	Umrechnungs- und Einheitendimensionierungsfaktor I
K_{II}	Umrechnungs- und Einheitendimensionierungsfaktor II
K_{III}	Umrechnungs- und Einheitendimensionierungsfaktor III
K_{IV}	Umrechnungs- und Einheitendimensionierungsfaktor IV
K_{wk}	Werkstoffkonstante
$L_{Distanz}$	Unspezifizierte Werkzeugwege
L	Menge einer Liste
m	Masse [kg]
m_x	Masse als Last bezogen auf die x-Achse [kg]
m_y	Masse als Last bezogen auf die y-Achse [kg]
m_{yz}	Masse der Arbeitsspindel bei kinematischer Achsbeziehung y und z [kg]
m_z	Masse als Last bezogen auf die z-Achse [kg]
$m_{Rohteil,Zustand 1}$	Masse des Rohteils im Zustand 1 [kg]
$m_{Werkzeug n,NC}$	Masse eines Werkzeugs und Werkzeugaufnahme [kg]

$\bar{m}_{\text{Werkzeug } n, NC}$	Durchschnittliche Werkzeugmasse im belegten Werkzeugmagazin [kg]
M_{dreh}	Drehmoment an den Schnittkanten beim Bohren [Nm]
M_{Geom}	Maschinengeometrie
MI	Mittelpunkt Kreisbahn
MV	Materialabtragsvolumen [cm ³ /min]
n	Stichprobengröße
n_c	Hauptspindeldrehzahl/ Drehzahl [U/min]
n_{op}	Anzahl der Operationsschritte durch Werkzeugwechsel
n_r^{NCi}	Zählvariable zur Ermittlung der Werkzeugwechsel in NC Programms i
n_T	NC-Satz
nc	Funktion der NC-Parser-Applikation
N_l	Menge der NC-Befehle
N_{NC}	Menge der NC-Sätze
O	Laufzeit [s]
p	Partikel
$p_{gb,i}$	Globaler bester Partikel i
p_i	Datenpunkt
$p_{lb,i}$	Lokaler bester Partikel i
p_m	Partikelanzahl der Generation m
p_{fehler}	Binärvariable des fehlerhaften Zustands eines Rechnerknoten
$p_{prüfung}$	Zufallszahl für die Überprüfbarkeit der Rechnerknoten
$p_{repariert}$	Binärvariable zur Wiederverfügbarkeit eines Rechnerknotens
P	Leistung (Werkzeugmaschine) [Watt]
P_B	Repräsentative Bearbeitungsposition
P_{MO}	Maschinennullpunkt
P_{NCO}	Programmnullpunkt
P_{Partikel}	Partikelpopulation
$pop_{wp}(t)$	Populationsgröße als Werkzeugpositionierung
q_{stop}	Stoppkriterium, Stoppparameter für den K-Means-Algorithmus

Q	Zeitspanvolumen [m ³ /min]
r	Radius (Maschinentisch) [mm]
r_{Kreis}	Radius Kreisbahn [mm]
$R^Z(\theta)$	Drehmatrix für die z-Achse im Raum R ³
$Scut$	Anzahl der Schneidstoffe
S_{res}	Resultierender Werkzeugweg allgemein [mm]
$S_{res}^{N_{NC}}$	Resultierender Werkzeugweg eines NC-Satzes [mm]
$S_{x,N_{NC}}$	Werkzeugwegziel des gegenwärtigen NC-Satzes für die x-Achse
$S_{x,N_{NC}-1}$	Werkzeugwegziel des vorangegangenen NC-Satzes für die x-Achse
$S_{y,N_{NC}}$	Werkzeugwegziel des gegenwärtigen NC-Satzes für die y-Achse
$S_{y,N_{NC}-1}$	Werkzeugwegziel des vorangegangenen NC-Satzes für die y-Achse
$S_{z,N_{NC}}$	Werkzeugwegziel des gegenwärtigen NC-Satzes für die z-Achse
$S_{z,N_{NC}-1}$	Werkzeugwegziel des vorangegangenen NC-Satzes für die z-Achse
S_x	Verfahrweg in kartesische Koordinatenrichtung x [mm]
S_x'	Weganteile für die x-Achse
S_y	Verfahrweg in kartesische Koordinatenrichtung y [mm]
S_y'	Weganteil für die y-Achse
S_z	Verfahrweg in kartesische Koordinatenrichtung z [mm]
S	Verfahrweg allgemein [mm]
$S_{K,G}$	Kreisbahnlänge bei der Kreisinterpolation [mm]
S_{gesamt}^{kum}	Kumulierter Verfahrweg [mm]
S_x^{kum}	Kumulierte Werkzeugverfahrwege für die x-Achse für alle NC-Sätze des NC-Programms [mm]
S_y^{kum}	Kumulierte Werkzeugverfahrwege für die y-Achse für alle NC-Sätze des NC-Programms [mm]
S_z^{kum}	Kumulierte Werkzeugverfahrwege für die z-Achse für alle NC-Sätze des NC-Programms [mm]
SSZ	Span-zu-Span-Zeit [s]
t_G	Gesamtzeit [s]

t_H	Hauptzeit [s]
t_N	Nebenzeit [s]
t_{nc}	Verfahrzeit beim NC-Programm [s]
t_{NZ}	Zyklusrelevante Nebenzeit [s]
t_{ZN}	Zykluszeit [s]
t_{auf}	Prozesszeit „Arbeitsraumtür öffnen“ [s]
t_{aus}	Prozesszeit für den Ausbau eines Werkzeugs aus der Maschine [s]
$t_{Ab,j}$	Werkzeugabsetzzeit nach Eingriff [s]
$t_{An,j}$	Werkzeuganfahzeit [s]
$t_{1,2,3}^{ges}$	Werkzeugeingriffszeit der repräsentativen Werkzeuge [s]
$t_{abbrechen}$	Prozesszeit für den Abbruch des Fertigungsprozesses [s]
$t_{bestücken}$	Prozesszeit für die Bestückung von Magazinplätzen [s]
t_{ein}	Prozesszeit für den Einbau eines Werkzeugs in die Maschine [s]
$t_{entnehmen}$	Prozesszeit für Werkzeugentnahmen aus dem Magazin [s]
$t_{Einsatz,nc,w}$	Eingriffsdauer eines Werkzeugs auf Basis eines NC-Programms [s]
t_{Grenz}	Grenzstandzeit für Werkzeugauswechselprozess [min]
$t_{0,A}$	Zeiteinheiten für die Optimierung der Partikelgruppe A
$t_{0,B}$	Zeiteinheiten für die Optimierung der Partikelgruppe B
$t_{0,C}$	Zeiteinheiten für die Optimierung der Partikelgruppe C
t_0	Zeiteinheiten für die Optimierung
t_r	Rotationseinheit zwischen zwei benachbarten Werkzeugen
t_{rot}	Prozesszeit einer Magazinrotation zwischen zwei benachbarten Werkzeugmagazinplätzen [s]
$t_{R,j}$	Werkzeugrückfahrzeit
t_{Rest}	Werkzeugmaschinenwartungs- und Einrichtzeiten
$t_{S,A}$	Zeiteinheiten für die Evaluation der Partikelgruppe A
$t_{S,B}$	Zeiteinheiten für die Evaluation der Partikelgruppe B
$t_{S,C}$	Zeiteinheiten für die Evaluation der Partikelgruppe C
t_S	Zeiteinheiten für die Evaluation

t_{ww}	Prozesszeit eines Werkzeugwechsels zwischen Doppelgreifer und Magazinplatz [s]
$t_{wechsel}$	Prozesszeit für den Werkzeugwechselfvorgang [s]
$t_{wechselzeitpunkt,T}$	Zeitpunkt der Werkzeuggentnahme nach kritischer Standzeit
$t_{wechselzeitpunkt}$	Werkzeugauswechselzeitpunkt
$t_{Werkzeug}$	Werkzeug- und Werkzeugpositionszeit gesamt
$t_{Werkzeug,w}$	Werkzeug- und Werkzeugpositionszeit eines Werkzeugs
t_{zu}	Prozesszeit „Arbeitsraumtür schließen“ [s]
$t_{zu,j}$	Werkzeugzuführzeit [s]
$T_{diskret}$	Unendlicher Bereich gleich großer diskreter Zeitschritte
T_{Rest}	Reststandzeit eines Werkzeugs [min]
$T_{initial}$	Standzeit eines Werkzeugs im initialen Zustand [min]
$T_{verbleib}$	Verbleibende Werkzeuge, Werkzeuglagerbestand
T	Standzeit eines Werkzeugs
T_w	Anzahl der Werkzeuge
$time$	Zeitfunktion für die Verwerfungsstrategie
$tool$	Funktion für die Werkzeugdefinition, Menge an Werkzeugen und zugehöriger Informationen
U	Anzahl der Umordnungsbefehle und -vorgänge der Werkzeuge
v_c	Schnittgeschwindigkeit [mm/min]
v_f	Vorschubgeschwindigkeit [mm/min]
v_i^t	Gegenwärtige Partikelgeschwindigkeit des Partikels i zum Zeitpunkt t
v_i^{t+1}	Aktualisierte Partikelgeschwindigkeit
v_{res}	Resultierende Vorschubgeschwindigkeit aus dem NC-Programm
v_x	Geschwindigkeit in x-Richtung (x-Achse) [mm/min]
v_y	Geschwindigkeit in y-Richtung (y-Achse) [mm/min]
v_z	Geschwindigkeit in z-Richtung (z-Achse) [mm/min]
$v_{PEZZNC,min}^{res}$	Resultierender Geschwindigkeitsfaktor auf Basis der minimalen erweiterten Zykluszeit [mm/s]
$v_{S_{gesamt,min}}^{res}$	Resultierender Geschwindigkeitsfaktor auf Basis des minimalen kumulierten Verfahrenswegs [mm/s]

w_{kap}	Werkzeugmagazinkapazität [Stück]
W	Arbeit der Achsbewegung für die Verfahrswege [J]
W_{P1}	Werkzeugeingriffspunkt Fall 1 vor der Werkstückdrehung
W_{P2}	Werkzeugeingriffspunkt Fall 2 nach der Werkstückdrehung
WL_r	Werkzeuglänge [mm]
WNC	Menge aller Werkzeuge die in das Magazin eingefügt werden sollen
x_{00}	Hilfsvariable zur Reduzierung der Anzahl möglicher Magazinbelegungen
x_{ij}	Binärvariable zur Platzüberprüfung von Werkzeug i auf Magazinplatz j
x_i^t	Gegenwärtige Partikelposition des Partikel i zum Zeitpunkt t
x_i^{t+1}	Aktualisierte Partikelposition des Partikels i
x_{kl}	Binärvariable zur Platzüberprüfung von Werkzeug k auf Magazinplatz l
x_{pq}	Variable zur Verarbeitung von übergroßen Werkzeugen
$x_{globalbest}$	Globale Optimum der Partikelposition
$x_{localbest}$	Lokale Optimum der Partikelposition
\bar{x}	Arithmetisches Mittel
\tilde{x}	Median
X	Datenmenge
X_A	Max. Verfahrsweg der Werkzeugmaschine im Arbeitsraum in x [mm]
X_M	Mittelpunktcoordinate für X
X_{PB}	Kartesische Koordinate x der repräsentativen Bearbeitungsposition
X_{PW}	Werkzeugwechselposition in x
X_t	Zielcoordinate für die kartesische Koordinatenrichtung X
$\overline{X_{EZZNC}}$	Arithmetisches Mittel der erweiterten Zykluszeit [s]
\bar{X}_o	Obere Schranke des arithmetischen Mittels
\bar{X}_u	Untere Schranke des arithmetischen Mittels
y_{ijkl}	Variable zur Linearisierung

Y_A	Max. Verfahrenweg der Werkzeugmaschine im Arbeitsraum in y [mm]
Y_M	Mittelpunktcoordinate für Y
Y_{PB}	Kartesische Koordinate y der repräsentativen Bearbeitungsposition
Y_{PW}	Werkzeugwechselposition in y
Y_t	Zielcoordinate für die kartesische Koordinatenrichtung Y
z	Anzahl der Schneiden am Werkzeug (Zähnezahl)
Z_A	Max. Verfahrenweg der Werkzeugmaschine im Arbeitsraum in z [mm]
Z_{PB}	Kartesische Koordinate z der repräsentativen Bearbeitungsposition
Z_{PW}	Werkzeugwechselposition in z
α	Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese
β	Beschleunigungskoeffizient des Partikelschwarms
ΔS_x	Werkzeugwegänderung der x-Achse [mm]
$\Delta S_{x,N,F}$	Werkzeugwegänderung der x-Achse für die interpolierte Bahnkurve [mm]
$\Delta S_{x,N,G0}$	Werkzeugwegänderung der x-Achse für den Eilgang [mm]
ΔS_y	Werkzeugwegänderung der y-Achse [mm]
$\Delta S_{y,N,F}$	Werkzeugwegänderung der y-Achse für die interpolierte Bahnkurve [mm]
$\Delta S_{y,N,G0}$	Werkzeugwegänderung der y-Achse für den Eilgang [mm]
ΔS_z	Werkzeugwegänderung der z-Achse [mm]
$\Delta S_{z,N,F}$	Werkzeugwegänderung der z-Achse für die interpolierte Bahnkurve [mm]
$\Delta S_{z,N,G0}$	Werkzeugwegänderung der z-Achse für den Eilgang [mm]
Δx_{trans}	Translatorische Koordinatenverschiebung für x
Δy_{trans}	Translatorische Koordinatenverschiebung für y
ε_i	Eingabevektor
ζ	Eingabevektor

Z	Zielfunktionswert für die Werkzeugpositionierung
η_M	Wirkungsgrad der Werkzeugmaschine
θ	Winkel für Aufspannorientierung [°]
κ	Konstante der Taylorgleichung
λ_{ik}	Anzahl der Werkzeugwechselfdistanzschritte von Werkzeug i zu k
M	Werkzeugpositionierung im Werkzeugmagazin
$\xi_{k,i}$	Polygonkante
ρ	Dichte des Werkstoffs [kg/m ³]
σ	Standardabweichung
τ_i	Werkzeug im Werkzeugmagazin an der Stelle i
τ_j	Werkzeug mit ID j
τ_r	Auszuwechselnde Werkzeug aus dem Werkzeugmagazin
τ_S	Anzahl der zu belegenden Magazinplätze im Werkzeugmagazin
Φ_t	Endwinkel für die Kreisinterpolation [°]
Φ_{t-1}	Startöffnungswinkel für die Kreisinterpolation [°]
Ψ	Anzahl der Maschinen
ω_{ij}	Variable zur Modellierung alternativer Einschränkungen für einen Werkzeugmagazinplatzbedarf < 1
$\omega_{inertia}$	Diagonalmatrix für den Trägheitsfaktor der Partikel
$\omega_{cognitive}$	Diagonalmatrix für den gegenseitigen kognitiven Einfluss der Partikel
ω_{social}	Diagonalmatrix für den gegenseitigen sozialen Einfluss der Partikel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die flexible Werkstückbefestigung (vgl. [Shi02])	32
Abbildung 2: Virtuelles Bedienfeld einer Fräsmaschine DMC 835V der <i>DMG MORI</i> AG (vgl. [DMG16a-ol], [DVM16-ol]).....	48
Abbildung 3: Steuerungsinterne Daten für die Werkzeugverwaltung nach <i>Indramat</i> aus <i>Weck</i> und <i>Brecher</i> (vgl. [WeBr06] S. 179)	63
Abbildung 4: Standzeit T in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit (vgl. [DiTs14]).....	64
Abbildung 5: Logarithmische Darstellung der Taylor-Gleichung (vgl. [DiTs14]).....	65
Abbildung 6: Werkzeug-Gerade bei einer Standzeit von T	66
Abbildung 7: Maschinen-Gerade bei konstanter Antriebsleistung P	67
Abbildung 8: Arbeitsbereich bei Ausnutzung von Maschinenleistung und Werkzeugstandzeit (vgl. [DiTs14])	68
Abbildung 9: Übersicht über den Aufbau von MSSP nach [Rol12-ol].....	70
Abbildung 10: Abgrenzung der Zykluszeit	80
Abbildung 11: Schematisches Arbeitsraumprinzipien bei verschiedenen geometrischen Maschinentischformen.....	85
Abbildung 12: Schematische Darstellung der simulationsgestützten Optimierungsschleife (vgl. [MKR+11]).....	86
Abbildung 13: Schematische Darstellung zur Bahnkurvenberechnung mithilfe von Kettenmaß.....	92
Abbildung 14: Schematische Darstellung zur Bahnkurvenberechnung mithilfe von Endpunkt und Radius.....	93
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Parallelisierung der Partikel-Evaluation bei der synchronen PSO.....	95
Abbildung 16: Gesamtablauf der zwei-phasigen Werkstückpositionierung	99
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Werkstückdrehungen um den Koordinatenursprung	104
Abbildung 18: Schematische Darstellung der Werkstückdrehungen um einen beliebigen Punkt	105

Abbildung 19: NC-Programm-Ausschnitt mit markierten Funktionen für den Werkzeugwechsel (vgl. [FrKe84])	112
Abbildung 20: Technologischer Abstand zwischen zwei Magazinplätzen	112
Abbildung 21: Ablaufdiagramm des MWZW	117
Abbildung 22: Handlungsprozess beim Werkzeugwechsel während der Fertigung	117
Abbildung 23: Handlungsprozess beim Werkzeugbestücken von der Lagereinheit in das Werkzeugmagazin	118
Abbildung 24: Handlungsprozess bei der Werkzeuggentnahme vom Magazin in die Lagereinheit	118
Abbildung 25: Handlungsprozess bei manuellem Werkzeugtausch und allgemeiner Unterbrechungen der Fertigung	119
Abbildung 26: Entscheidungsbaum für das MWZW	126
Abbildung 27: Ermittlung des optimalen Arbeitspunkts bei konstanter Antriebs- leistung und definierter Standzeit	136
Abbildung 28: Interprozessurale Auswirkungen der Arbeitspunkte bei Nutzung gleicher Werkzeuge in verschiedenen Prozessen	136
Abbildung 29: Theoretische Fallunterscheidung hinsichtlich der Werkzeug- und Maschinen-Geraden	139
Abbildung 30: Maschinen- und Werkzeug-Geraden/Kurve anhand realer Para- meter	142
Abbildung 31: Relationales Datenbankmodell zur Fertigungsparameterüberwachung und Einhaltung der Standzeit am Beispiel <i>Drehen</i>	148
Abbildung 32: Datenbankmodellausschnitt zur Anpassung der Datenstruktur für den Prozess <i>Fräsen</i>	150
Abbildung 33: Datenbankmodellausschnitt zur Anpassung der Datenstruktur für den Prozess <i>Bohren</i>	151
Abbildung 34: Exemplarische Auswahl der Masken der Benutzerschnittstelle	154
Abbildung 35: Flussdiagramm über den Eingabeprozess zur Ansteuerung der Auftragsdefinition und Werkstückpositionierung	155
Abbildung 36: Darstellung der Auftragsverwaltung und Werkstückpositionierung im MSSP	156
Abbildung 37: Schnittstelle zur Bedienung der vWZM (vgl. [DVM16-01])	158

Abbildung 38: Grundstruktur der VMDE zur Einrichtung der vWZM (vgl.[Wei11], [DVM16-ol]).....	159
Abbildung 39: Schematischer Aufbau der VMDE-Struktur (vgl. [Wei11], [DVM16-ol]).....	160
Abbildung 40: Prinzip der Veränderung der Koordinaten der Werkstückposition.....	161
Abbildung 41: Manuelle Positionsveränderung von Werkstück und Spannmittel in der Simulation (vgl. [DVM16-ol])	161
Abbildung 42: Datenbankmodell für das Aufspannverfahren I	163
Abbildung 43: Datenbank-Entitäten in tabellarischer Form der Tabelle <i>production_step_has_workplace</i>	164
Abbildung 44: Positionsdaten aus der Tabelle „ <i>vmde_jos</i> “	165
Abbildung 45: Positionskoordinaten aus der Tabelle „ <i>setup_position</i> “	165
Abbildung 46: Demonstrationsmodelle der Werkstücke A und B als Rohteil und mit Zielgeometrie nach der Simulation	166
Abbildung 47: Visualisierung der Verfahrenswegeabschätzung durch die NC-Parser- Applikation für Werkstück A und B.....	167
Abbildung 48: Fräsmaschinenmodell <i>DMC80FD duoBLOCK®</i> (vgl. [DVM16-ol], [DMU16-ol]).....	169
Abbildung 49: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 50 Partikeln	176
Abbildung 50: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 50 Partikeln	178
Abbildung 51: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 100 Partikeln	180
Abbildung 52: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 100 Partikeln	181
Abbildung 53: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 50 Partikeln	183
Abbildung 54: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 50 Partikeln	184
Abbildung 55: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 100 Partikeln	186

Abbildung 56: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 100 Partikeln	187
Abbildung 57: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 50 Partikeln	189
Abbildung 58: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 50 Partikeln	190
Abbildung 59: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 100 Partikeln	192
Abbildung 60: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 100 Partikeln	193
Abbildung 61: Übersicht der Lage der Aufspannkoordinate für 4 Cluster und 2 Dimensionen unter Beachtung der Tischebene im Maschinen- arbeitsraum	198
Abbildung 62: Invalide Aufspannpositionen.....	199
Abbildung 63: Zusammenhang zwischen t_{ZN} und der Werkzeugwechselzeit bei ausgewählten Versuchen	200
Abbildung 64: Vergleich der Differenzen von $t_{ZN, Initialaufspannung}$ und $t_{ZN, Versuch}$ sowie zwischen den Werkzeugwechselzeiten bei ausgewählten Versuchen	200
Abbildung 65: Übersicht über die Zeitentwicklung von t_{ZN} im Verlauf der diskreten Variation des Aufspannorientierungswinkels θ	202
Abbildung 66: Kumulierte Verfahrswege der Achsen während der Fertigung mit der Aufspannorientierung von 0° bis 360° für Werkzeug A	203
Abbildung 67: Kumulierte Verfahrswege je Maschinenachse als Boundary-Box- Übersicht für die Aufspannorientierung $\theta = 150^\circ$, $\theta = 240^\circ$, $\theta = 330^\circ$ aus der Benutzerschnittstelle	205
Abbildung 68: Kumulierte Verfahrswege als Boundary-Box-Übersicht für die Aufspannorientierung $\theta = 90^\circ$ und 270° , $\theta = 0^\circ$ und 180° für $S_{x,\min}^{\text{kum}}$ und $S_{y,\min}^{\text{kum}}$ aus der Benutzerschnittstelle	205
Abbildung 69: Kumulierte Verfahrswege der Achse während der Fertigung mit der Aufspannorientierung von 0° bis 360° für Werkstück B.....	207
Abbildung 70: Kumulierte Verfahrswege der Achse während der Fertigung mit der Aufspannorientierung von 0° bis 360° für Werkzeug B.....	208

Abbildung 71: Boundary-Box-Diagramme für die Aufspannorientierung $\theta = 325^\circ$ für $S_{\text{gesamt,min}}^{\text{kum}}$, $\theta = 315^\circ$ für $t_{zN,\text{min}}$, $\theta = 90^\circ$ und 270° für $S_{x,\text{min}}^{\text{kum}}$ sowie $\theta = 0^\circ$ und 180° für $S_{y,\text{min}}^{\text{kum}}$	208
Abbildung 72: Übersicht der Positionskordinaten für 4 Cluster und 2 Dimensionen unter Beachtung der Initialaufspannung außerhalb des Tischzentrums	210
Abbildung 73: 3D-Modell der Schlittenplatte	214
Abbildung 74: Vergleich der Fitnesswerte	218
Abbildung 75: Schematischer Ablauf für die Standzeitvorabüberprüfung	223
Abbildung 76: GUI zur Überprüfung der Werkzeuge bzgl. Standzeitanforderung	223
Abbildung 77: Überlagernde Werkzeug- und Maschinengerade	232
Abbildung 78: Schematische Darstellung der PSO-Algorithmus-Erweiterung für Aufspannverfahren II.....	238
Abbildung 79: Vergleich der Fitnesswerte der asynchronen und synchronen PSO-Erweiterung bei Rechnerressourcenausfall (vgl. [RWL+15])	241
Abbildung 80: Konvergenzverhalten für eine translatorische Werkstückpositionierung bei 2 Dimensionen für 4 bis 8 Clustern und 20, 30 und 50 Generationen.	243
Abbildung 81: Computergestützte Berechnung von $Y_{M,1}$	250
Abbildung 82: Computergestützte Berechnung von $Y_{M,2}$	251
Abbildung 83: Computergestützte Berechnung von $X_{M,1}$	252
Abbildung 84: Computergestützte Berechnung von $X_{M,2}$	253
Abbildung 85: <i>Optimization-Toolbox</i> -GUI von MATLAB R2015b.....	257
Abbildung 86: Konvergenz des GA bei Anwendung des MWZW	257
Abbildung 87: Begriffslandkarte des Themenkomplexes <i>Social Software</i> nach Back et al. (vgl. [BGT12]), in Martens (vgl. [Mar14])	269

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: NC-Programmausschnitt nach <i>Franz</i> und <i>Kern</i> (vgl. [FrKe84])	34
Tabelle 2: Darstellung der Satzelemente eines NC-Satzes (vgl. [Eve97])	37
Tabelle 3: Beispiele von G- und M-Funktionen nach DIN 66025 ([FGH+11], [FGH+08] S. 328ff., S. 392ff.)	37
Tabelle 4: Vergleich marktüblicher Testumgebungen für NC-Programme, CNC- Maschinen-Simulationen und CAM-Programme	44
Tabelle 5: Beispielfunktionen einer Maschinensimulation (vgl. [Cos16a-ol])	46
Tabelle 6: Klassifizierung von Standzeiten nach Maschinen und Rüstzeit (vgl. [DiTs14])	65
Tabelle 7: Relevante Fahrbefehle in G-Code	100
Tabelle 8: Übersicht über die kumulierten Maschinenwege, bezogen auf den Programmnullpunkt in kartesischen Koordinaten	102
Tabelle 9: Messzeiten der Prozesse zur Erstellung des MWZW auf Basis der SSZ....	120
Tabelle 10: Messergebnisse, basierend auf der SSZ nach VDI 2852 Blatt 1	123
Tabelle 11: Eigenschaften der NC-Programme der Werkstücke A und B	167
Tabelle 12: Übersicht über NC-Programm-Modifikationen für Werkstück A und B..	171
Tabelle 13: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 50 Partikeln	174
Tabelle 14: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 50 Partikeln	177
Tabelle 15: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 100 Partikeln	179
Tabelle 16: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 100 Partikeln	181

Tabelle 17: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 50 Partikeln	182
Tabelle 18: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 50 Partikeln	184
Tabelle 19: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 100 Partikeln	185
Tabelle 20: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 100 Partikeln	186
Tabelle 21: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 50 Partikeln	188
Tabelle 22: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 50 Partikeln	189
Tabelle 23: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 100 Partikeln	191
Tabelle 24: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 100 Partikeln	192
Tabelle 25: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei Einbezug der z -Koordinate und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 50 Partikeln ohne Orientierungsänderung.....	195
Tabelle 26: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei Einbezug der z -Koordinate und θ bei 20 Generationen und 50 Partikeln	196
Tabelle 27: Zusammenhang zwischen Reduzierung von t_{ZN} und der Werkzeugwechselzeit durch Positionskoordinaten mit 2 Dimensionen....	197
Tabelle 28: Randdaten der Aufspannorientierung bei $\theta \in [0;360^\circ[$ für Werkstück A	201

Tabelle 29: Randdaten der Aufspannorientierung bei $\theta \in [0;360^\circ[$ für Werkstück B.....	207
Tabelle 30: Einzelbetrachtung der Aufspannorientierung für die x-Achse und y-Achse	208
Tabelle 31: Identifizierte Werkstückpositionierung der Versuchsreihen mit 4 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen, ausgehend von asymmetrischen Initialkoordinaten.....	210
Tabelle 32: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 1	211
Tabelle 33: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 2	211
Tabelle 34: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 3	212
Tabelle 35: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 4	212
Tabelle 36: Ermittelte Startbelegung der Werkzeuge als Zuordnung zu den Werkzeugmagazinplätzen durch MWZW	215
Tabelle 37: Ermittelte Startbelegung der Werkzeuge unter Annahme der sukzessiven Zuordnung durch den <i>Greedy-Ansatz</i>	216
Tabelle 38: Startbelegung der Werkzeugzuordnung zu den Magazinplätzen durch natürliche Personen.....	217
Tabelle 39: Maschinenvergleich für Werkzeugwechselprozesse.....	219
Tabelle 40: Lösung der Optimierung unter Nutzung des <i>Solvers</i>	220
Tabelle 41: Gesamte Werkzeugwechselzeit $t_{Werkzeug}$ unter Verwendung des Zielfunktionswertes aus Gleichung 5.86 aus Kapitel 5.2.7	220
Tabelle 42: Zusammenfassende Ergebnisse für die Werkzeugpositionierung.....	228
Tabelle 43: Konfidenzanalyse der Versuchsreihen für Werkstück B zur Werkstückpositionierung bei Standardeinstellung	244
Tabelle 44: Attribute der Entitäten der Datenbank für die Werkstückpositionierung..	247
Tabelle 45: Span-zu-Span-Zeiten nach VDI 2852 Blatt 1.....	256
Tabelle 46: NC-Befehl-Reihenfolge für die Werkzeugaufrufe während der Fertigung.....	258
Tabelle 47: Relevante technische Angaben der Fräsmaschine.....	259
Tabelle 48: Allgemeine technische Angaben zur Werkzeugmaschine	259

Tabelle 49: Ergebnisse für die Startbelegung der Werkzeugmagazinbestückung unter Nutzung des MWZW	263
Tabelle 50: Ergebnisse für die Werkzeugwechselzeit und die Startbelegung der Werkzeugmagazinbestückung durch befragte Personen	265
Tabelle 51: Kategorien der E-Kollaborationssysteme nach <i>Munkvold</i> und <i>Zigurs</i> (vgl. [MuZi05]).....	270

Definitionsverzeichnis

Definition 1: Einrichtsituation	3
Definition 2: Arbeitsraum.....	3
Definition 3: Virtuelle Werkzeugmaschine	4
Definition 4: Simulation	4
Definition 5: Werkstückpositionierung	4
Definition 6: Werkstückposition	5
Definition 7: Kollision.....	5
Definition 8: NC-Befehl	8
Definition 9: NC-Satz.....	8
Definition 10: Werkzeugpositionierung	17
Definition 11: Standzeit.....	18
Definition 12: Benutzerschnittstelle	25
Definition 13: Benutzeroberfläche	25
Definition 14: Workflow	27
Definition 15: Zykluszeit im Fertigungskontext	79
Definition 16: Nebenzeit	79
Definition 17: Hauptzeit	80
Definition 18: Strategie	84
Definition 19: NC-Parser-Applikation	89

Pseudocodeverzeichnis

Pseudocode 1: Überprüfung der Standzeit der Werkzeuge	146
Pseudocode 2: PSO-Algorithmus (vgl. [KeEb01], [KeEb95]).....	246
Pseudocode 3: K-Means Cluster-Algorithmus (vgl. [ZaWa14] S. 335)	246
Pseudocode 4: Genetischer Algorithmus (vgl. [LKM+99])	262

1 Einleitung

Die technische Verbesserung von Werkzeugmaschinen stößt an ihre Grenzen. Reibungsarme Servoantriebe, Werkzeuge mit sehr guten Materialeigenschaften, eine präzise Spindelführung und leistungsstarke Steuerungen ermöglichen eine Fertigung mit einer hohen Genauigkeit. Zeiteinsparungen durch eine Verringerung der Hauptzeit sind nur noch marginal. Damit ist eine signifikante Fertigungszeitreduzierung nur noch über die Reduzierung der Nebenzeit oder eine kombinierte Reduzierung von Haupt- und Nebenzeit realisierbar. Das bedeutet, dass spezifische Größen wie Werkzeugrücklaufzeiten, Anhebezeiten, Werkzeugwechselfade usw. verringert werden können und müssen. Diese Größen werden unter dem Begriff der Zykluszeit subsumiert, deren Wert sich mit der jeweiligen Maschineneinrichtung verändert. Mit „Maschineneinrichtung“ bezeichnen wir hier die Position des Werkstücks und des Spannmittels sowie die Position der Werkzeuge auf Basis des zugrunde liegenden NC-Programms. Ein geschicktes Positionieren der Werkstücke und Werkzeuge verkürzt Werkzeugwege oder Sicherheitsabstände. Die Überprüfung dieser Positionierung erfolgt heute modellbasiert. Dabei steht die Kollisionsprüfung mithilfe einer Simulation im Fokus; Kollisionen von Arbeitsspindel bzw. Werkzeug und Werkstück werden hier erkannt. Die Reduzierung von Zykluszeiten durch geschicktes Positionieren erfolgt aber zufällig. Weil aber eine Kollisionsüberprüfung für jedes Fertigungsszenario obligatorisch ist, könnte sich die Reduzierung der Zykluszeit mit einer geeigneten Einbindung als Synergieeffekt ergeben.

Zur Durchführung der Simulation stehen dem Nutzer (kommerzielle) Softwarewerkzeuge, bspw. ein (virtuelles) CNC⁴-Werkzeugmaschinen-Modell mit CAD/CAM-Schnittstelle, zur Verfügung (vgl. bspw. [DVM16-ol]). Derartige Softwarewerkzeuge verwenden die reale Steuerung, sodass der Nutzer eine Validierung des NC-Programms erhält. Diese Steuerung verarbeitet dabei die Bahnsteuerung (G-Code) durch die NC-Einheit und in Kombination mit der SPS-Einheit logische Nebenprozesse wie z. B. die Zuführung von Kühlmittel, Befehle zum Programmende oder das Einbinden von Unterprogrammen, Werkzeugwechsel, Sicherheitsverriegelungen (Türsteuerung) usw. Diese NC-Befehle sind daher parallel zu der Überprüfung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung mit Blick auf die Zykluszeit über eine Nutzerschnittstelle anzupassen. Hier ist ein erhöhter Experimentieraufwand unumgänglich. Daher ist eine modellbasierte Umsetzung zu verfolgen.

⁴ CNC steht für Computerized Numerical Control, wird aber auch als Computer Numerical Control abgekürzt.

2 Defizite bei der NC-Programmierung und -überprüfung

Die Werkstückpositionierung im Maschinenarbeitsraum und die Werkzeugpositionierung im Werkzeugmagazin mit dem Ziel einer nutzbaren Werkzeugstartbelegung und Aufspannkoordinatenüberprüfung spielen in der Arbeitsvorbereitung unter Nutzung von Simulationsmodellen unter gleichzeitiger Validierung der NC-Programme eine untergeordnete Rolle, da dafür keine Experimentierzeit eingeplant wird.⁵ Eine mögliche Verbesserung bzw. einfache Veränderung des NC-Programms zur Realisierung einer besseren Maschineneinrichtung bezogen auf Werkstück- und Werkzeugpositionierung findet nicht statt. Die Modelle liegen zudem als geschlossene Softwarewerkzeuge vor und sind häufig auf lokalen Rechereinheiten installiert⁶. Dadurch ist eine ortsunabhängige NC-Programmvalidierung nicht möglich. Zudem ist eine Abstimmung zwischen Planer und Maschinenbediener (Werker) unabdingbar, da die Kommunikation der Prüfergebnisse nicht als Standard gewährleistet ist.

Definition 1: Einrichtsituation

Die Einrichtsituation einer Werkzeugmaschine meint den Zustand einer Werkzeugmaschine nach Vorbereitung und Einrüstung mit allen für den bevorstehenden Fertigungsprozess notwendigen Elementen. Sie umfasst bspw. die Ausstattung der Maschine mit aufgespanntem Werkstück und Spannmittel im Arbeitsraum der Maschine, die positionierten Werkzeuge sowie das geladene NC-Programm. Zugehörig sind auch ergänzende Tätigkeiten zur Vorbereitung der Maschine, wie z. B. die Festlegung von Nullpunkten oder Ausmessprozesse. Zur Erstellung einer Einrichtsituation ist der Einrichtprozess der Maschine erforderlich.

Definition 2: Arbeitsraum

Als Arbeitsraum wird der Raumbereich (einer Werkzeugmaschine) bezeichnet, der vom Mittelpunkt der Schnittstelle zwischen den Nebenachsen der Maschine und dem Effektor

⁵ Die Überprüfung solcher Werkstückpositionen erfordert in der Regel mehrere Überprüfungsprozesse (Experimente) durch Simulationswerkzeuge, was durch die Planung nicht zwangsläufig gegeben ist. Das bedeutet, dass, sobald eine brauchbare Werkstückposition durch die Simulation identifiziert wird, diese auch ausgewählt wird und keine weiteren Ressourcen verbraucht, eine zeitsparendere Position zu finden. Dieses Vorgehen ist auch aus praktischer Sicht im industriellen Kontext nur logisch. So kann es problematisch und unbefriedigend sein, dass die durch den Maschinenbediener intuitiv entschiedene Werkstückposition auf dem Maschinentisch zu einem verlängerten Einfahrprozess sowie zu insgesamt längeren Fahrzeiten der Maschine führt und dadurch die Fertigungszeit unmittelbar negativ beeinflusst wird. Das führt auch dazu, dass die weitere Überprüfung und Verbesserung der NC-Programme keiner Priorität unterliegen, sollten bereits Parameter bekannt sein, die eine valide Fertigung ermöglichen.

⁶ Die lokal verfügbaren Softwarewerkzeugen stehen in Organisationseinheiten auch durch eine Client-Server-Architekturlösung (z. B. als Rich-Client) zur Verfügung, bei der die Anwender einen lokalen Client nutzen, um auf einen zentralen Server zuzugreifen, um die dort installierte Software zu nutzen. Hierbei ist in Organisationen die sinnvolle Verteilung von Rollen und Rechte relevant sowie ggf. eine Integration von Dritte notwendig.

(Werkzeug, Greifer) mit der Gesamtheit aller Achsbewegungen erreicht werden kann (vgl. [VDI2861]).

Definition 3: Virtuelle Werkzeugmaschine

Unter „virtuelle Werkzeugmaschine“⁷ wird ein Modell⁸ einer realen Werkzeugmaschine⁹ verstanden, das in Abhängigkeit des geforderten Detaillierungsgrads bestimmte physikalische und prozesstechnische Eigenschaften widerspiegelt, um ein Fertigungsszenario darzustellen.¹⁰ Der Begriff „virtuell“ leitet sich aus der Virtualisierung ab, worunter eine Methode zur Abstraktion verstanden wird, bei der dem Nutzer scheinbar vorhandene Ressourcen zur Verfügung gestellt werden, als wenn sie real vorhanden wären [ScWe07].

Die virtuelle Werkzeugmaschine meint im Rahmen der Arbeit das Simulationswerkzeug einer real existierenden Werkzeugmaschine. Die Gestaltung des Simulationswerkzeugs hängt dabei von den Anforderungen ab, die durch das Werkzeug erfüllt werden müssen. In der Arbeit wird hierbei immer auch von einer Softwarelösung ausgegangen (vgl. auch Kapitel 3.1.2.3).

Definition 4: Simulation

Angelehnt daran, wird Simulation in der VDI 3633 Blatt 1 als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“, definiert. „[...] Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“ (vgl. [VDI3363], [Küh06] S. 20)

Definition 5: Werkstückpositionierung

Unter Werkstückpositionierung wird hier das Positionieren eines Werkstücks im Arbeitsraum einer virtuellen und auch einer realen Werkzeugmaschine verstanden. In der Regel ist bei der Werkstückpositionierung auch die Position des Spannmittels inbegriffen, wenn davon auszugehen ist, dass die Änderung der Werkstückposition auch eine Änderung des Spannmittels zwangsläufig mit sich bringt.

⁷ Ein synonyme Begriff ist „virtuelles Maschinenmodell“.

⁸ Das Modell umfasst im praktischen Einsatz ein Simulationswerkzeug in Form einer Softwarelösung (Simulationslösung). Als Modellbegriff steht hinter „Modell“ die abstrahierte Abbildung eines Ausschnitts aus der Realität (vgl. [LLS10]).

⁹ „Unter einer Werkzeugmaschine werden alle Maschinen subsumiert, die der Fertigung von mechanischen Komponenten definierter und reproduzierbarer Formen mit der Zuhilfenahme von Werkzeugen dienen“ (vgl. [Neu12]). Die in der Arbeit gemeinten Werkzeugmaschinen dienen der spanenden Fertigung und werden auch als CNC- bzw. NC-Maschinen bezeichnet. Im Rahmen der Arbeit ist mit Werkzeugmaschine die reale Werkzeugmaschine gemeint.

¹⁰ Die Definition ist hier aus den Begriffen „virtuell“ und „Werkzeugmaschine“ abgeleitet und orientiert sich an den zugrunde liegenden Simulationswerkzeugen.

Definition 6: Werkstückposition

Mit der Werkstückposition ist die unter Angabe von Koordinaten oder anderen diskret messbaren Angaben definierte Lage bzw. Position des Werkstücks inklusive Spannmittel im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine gemeint. Mit der Werkstückposition gehen in der Regel die Lagerung und Befestigung des Werkstücks auf dem Maschinentisch einher. Die Begriffe Aufspannlage, Aufspannposition und Anordnung können hierbei synonym verwendet werden.

Definition 7: Kollision

Unter Kollision wird allgemein der Aufprall, der Zusammenstoß oder eine Karambolage verstanden (vgl. [Dud96], [Dud16-ol]). Im Bereich der Überprüfung von NC-Programmen durch Werkzeugmaschinensimulationen wird von einer Kollision gesprochen, wenn es sich um unbeabsichtigte oder ungewollte physikalische Berührungen zwischen Werkzeugen und Werkstücken sowie anderen Peripheriebestandteilen des Systems Werkzeugmaschine, insb. den Arbeitsraum der Maschine betreffend, handelt.¹¹

2.1 Zykluszeitreduzierende Werkstückpositionierung

Die Nutzung digitaler Werkzeuge wie CAD/CAM oder (allgemeine) Betriebsmittelsimulationen, wie das Werkzeugmaschinenmodell, sind in der Fertigung sowie in der Arbeitsvorbereitung und -planung nicht mehr wegzudenken. Auch sind das Einbinden von hohem Fachwissen, Erfahrungen von Mitarbeitern und die Schaffung von Planungssicherheiten durch Simulationen für die Arbeitsplanung noch längst nicht ausgeschöpft (vgl. [DLC+10-ol], S. 6–11). In der Arbeitspraxis bzgl. der Arbeitsvorbereitung von Fertigungsprozessen der spanenden Fertigung mithilfe von Werkzeugmaschinen erfolgt ein Rückgriff auf Simulationswerkzeuge, um die NC-Programme zu verifizieren. Dabei werden das reale Fertigen mithilfe der zuvor erstellten NC-Programme und Überprüfen durch einen oder mehrere Mitarbeiter durchgeführt. Dabei kann es häufig zu Defiziten zwischen der geplanten Aufspannlage des Werkstücks, ausgehend von der Arbeitsplanung und dem langjährigen Erfahrungsschatz des Werkers in der Fertigung (Arbeitsplatz), und der realen Aufspannposition an der Maschine kommen. Das virtuelle Aufspannen und die damit verbundene Ermittlung der validen Aufspannmöglichkeiten können dadurch erweitert werden, dass Werkstückpositionen vorgeschlagen werden, die auch die Arbeitszeit verringern. Gerade die Variantenvielfalt, inwiefern ein Werkstück spanend hergestellt werden kann, bringt ein Optimierungspotenzial hinsichtlich der Werkstückpositionierung im Arbeitsraum mit sich, sodass es sich lohnt, diese von vornherein zu verbessern. Dies wird

¹¹ Eine Abgrenzung ist dahingehend wichtig, da eine (beabsichtigte oder gewollte) Kollision auch durch das Berühren von Werkzeug und Werkstück an definierten Flächen und Linien, die durch die NC-Befehle vorgegeben werden, zustande kommt. Als kollisionsfrei ist daher der Zustand gemeint, der ungewollte Kollisionen im Zuge der gegenwärtigen Aufspannkoordinaten vermeidet.

ermöglicht, indem das NC-Programm direkt und auftragsgebunden auf die Aufspannposition eingestellt und automatisch justiert, bzw. angepasst und konfiguriert wird und nicht nachträglich durch sukzessive Verbesserungsprozesse oder sogar durch den Werker selber am Steuerungspanel der Maschine, was die Maschineneinrichtung und das Einfahren verlängern und insgesamt erschweren würde.

Auch ist eine außerplanmäßige Suche einer zeitsparenden Werkstückpositionierung obsolet, sollte eine vorab erkannte gültige Werkstückposition bekannt sein. Bei weiteren Suchvorgängen, die zu möglichen verbesserten Aufspannsituationen führen, sind nach wie vor weitere Simulationsvorgänge notwendig, bei denen ein Mitarbeiter unnötig gebunden wird. Insbesondere ist dies dann ungünstig, wenn faktisch mehrere Werkstückpositionen durchsimuliert werden müssen. Die dafür notwendige Arbeitszeit ist wegen enger Fertigungs- und Projektziele nicht berücksichtigt und auch nicht vorgesehen: Der zeitliche Mehraufwand für die Identifikation einer zykluszeitreduzierenden Werkstückpositionierung durch den Planer (z. B. mittels Einzelsimulationen) könnte dabei höher sein als die Zeiteinsparung, die durch die neue Werkstückposition gewährt wird, sodass keine weiteren Personalressourcen dafür verwendet werden.

Als Beispiel für den verbundenen Mehraufwand durch manuelle Änderungen der Aufspannsituation sei dazu das manuelle Anpassen von NC-Befehlen zur Realisierung der Orientierungsänderung des Werkstücks um einen Winkel θ genannt. Während bei translatorischen Verschiebungen die Steuerung die Nullpunkte unangepasst verarbeiten kann, müssen bei einer Orientierungsänderung zwangsläufig alle Nullpunktverschiebungen an eine geänderte Orientierung des Werkstücks im NC-Programm ebenfalls angepasst werden, was in Abhängigkeit der NC-Programmlänge einen hohen Aufwand für den Einrichtungsprozess bedeutet. Aus Sicht des Werkers ergibt sich somit keine andere Umspannmöglichkeit als die initial vorgegebene Aufspannposition. Dabei ist diese ggf. umständlich oder führt zu einer längeren Fertigungszeit, was in Kauf genommen wird. Diese Initialaufspannung kann sogar Kollisionen mit sich bringen, sollte während der Fertigung nicht entsprechend umgespannt oder manuell eingegriffen¹² werden.

Insgesamt gibt es viele Anstrengungen, die Hauptzeiten bei der Fertigung zu reduzieren und dies durch gezieltes Verändern von Parametern auch in das NC-Programm einzuarbeiten. Jedoch werden hierbei nicht die Nebenzeit sowie die zykluszeitrelevanten Werkstückpositionen berücksichtigt. So ist in dem Beitrag von *Sencer et al.* (vgl. [SAC08]) zum Beispiel eine Verbesserung der Hauptzeit durch die Anpassung der Vorschübe des Werkzeugweges, was im NC-Programm im Praxisfall angepasst werden muss, während der Fertigung mit einer 5-Achs-Fräse thematisiert (basierend auf kubische B-Spline-Kurven). Jedoch wird explizit nicht weiter auf die Aufspannposition eingegangen, die so gesehen keine Auswirkungen auf den direkten Werkzeugweg am Werkstück hat, der während der Werkzeugwirkung auf das Werkstück, ausgehend vom Werkstücknullpunkt, zu-

¹² Der Eingriff umfasst in der Regel eine Fertigungsunterbrechung mit zusätzlicher nachträglicher Anpassung der Maschineneinrichtung.

rückgelegt wird [SAC08]. Auch ist es fahrlässig, bei einer höheren Vorschubgeschwindigkeit auf eine Überprüfung des Fertigungsprozesses durch z. B. Simulationsmodelle zu verzichten, sodass eine Überprüfung immer stattfinden sollte. Zur Verbesserung von Bearbeitungsparametern wird ferner im Beitrag von *Zhang* und *Chen* (vgl. [ZhCh09]) eine Methode dargestellt, diese durch die *Taguchi-Methode* zu gewährleisten sowie für Drehbearbeitungen mithilfe von *Desirability-Funktionen* (vgl. [ASK+08]).

Zur Verbesserung (d. h. zeitsparendes Arbeiten) der Bahnkurven bei virtuellen Werkzeugmaschinenmodellen bietet bspw. der Beitrag von *Afifi* et al. (vgl. [AHK11]) erste Ansätze, die aber hauptsächlich Auswirkungen auf das Werkzeugmanagement haben. Eine konkrete Definition und Beschreibung der Werkstückposition sind nicht vorgesehen, was somit Raum für individuelle Entscheidungen zulässt, die auf die Erfahrung des Maschinenbedieners zurückzuführen sind und somit auch Fehlentscheidungen zulassen. Dadurch kann das NC-Programm folglich fehlerhaft sein, die Werkstückposition ungewollte Kollisionen oder lange Fertigungszeiten nach sich ziehen, ein ungewolltes Umspannen oder ein erneutes ungeplantes Anfahren notwendig werden. Die durch einen verbesserten Werkzeugumgang eingesparte Zeit kann dabei sogar durch eine unvorteilhafte Werkstückposition negiert werden.

2.1.1 Grenzen bei der Darstellung von Fertigungsverfahren nach der Werkstückpositionierung durch Simulation als Testumgebung

Derzeit sind die Simulationsmodelle statische Softwaremodule, die einzelne Simulationen, Einrichtungssituationen und NC-Programme verifizieren können. Jede neukonfigurierte Aufspannsituation erfordert einen separaten neuen Simulationsprozess, sodass während der Simulation einzelne NC-Sätze nicht immer nach Belieben wiederholt¹³ (abgefahren) werden können, sondern das gesamte Programm. Dabei sind nur Einzelsimulationen möglich, die insbesondere bei Testläufen mit einer hohen Anzahl an verschiedenen Aufspannsituationen sehr zeitintensiv werden. Hinzu kommt, dass diese dabei kontinuierlich manuell bedient werden müssen, was für den Planer neben dem höheren Arbeitszeiteinsatz einen monotonen Arbeitsprozess nach sich zieht.

Die Weiterverarbeitung der verifizierten Daten wird standardmäßig ebenfalls manuell durch den Mitarbeiter durchgeführt. Die visualisierten Fertigungsprozesse werden kinematisch korrekt abgebildet, jedoch ist hierbei nicht unbedingt deutlich erkennbar, zu welchem NC-Befehl ein auftretender Fehler zugeordnet werden könnte – eine Auswertung in Protokollform oder ein „Konsolen-Log“ ist dabei eine Möglichkeit, die Fehler nachträglich konkret zu identifizieren. Dem Nutzer werden lediglich visuelle Markierungen während der Fertigungssimulation angezeigt. Es werden in der Steuerung nur die Fehler

¹³ Vor Simulationsstart kann die Entscheidung getroffen werden, ob die Simulation jeden Satz einzeln darstellt und nach jedem Satz die Simulation anhält oder ob für das NC-Programm sukzessiv alle Sätze ohne Unterbrechung simuliert werden sollen.

zurückgegeben, die sich mit den Fehlern decken, die auch bei einer realen Maschine auftreten würden (bedingt durch die Verwendung der realen Steuerung). Ein Beispiel hierzu ist der Softwareendschalter, der ein automatisches Abschalten von z. B. Schwenkachsen der Maschine auslöst. Hierbei wird der betroffene NC-Satz zurückgeliefert: Eine manuelle Verarbeitung ist danach unabdingbar – der Nutzer muss eingreifen und eigene Entscheidungen bzgl. der Korrektur treffen.

Definition 8: NC-Befehl

NC-Befehl meint ein einzelnes Kommando, bestehend aus Adressbuchstaben und Parametern, der die Werkzeugmaschine oder Komponenten davon steuert und aus der Norm und/oder aus den herstellereigenen Steuerungsangaben hervorgeht. Eine Kombination von NC-Befehlen ergibt einen NC-Satz.

Definition 9: NC-Satz

Ein NC-Satz besteht aus einem oder mehreren NC-Befehlen und kann der Länge nach variieren, d. h. vom Fahren eines Zyklus oder Fertigung einer bestimmten geometrischen Form (z. B. Fräsen einer Tasche) bis hin zu Koordinaten, die sequenziell angefahren werden. Häufig beziehen sich die NC-Sätze auf eine Zeile im NC-Programm und sind im Programm mit der Satznummer N versehen. Jeder Satz ist in der Regel nummeriert.

Durch visuelle Betrachtung der Steuerung, insb. der Warnmeldungen, und durch ein manuelles Aufrufen des NC-Programms können Fehler durch manuelle Suchprozesse identifiziert werden, jedoch ohne dabei ein Feedback zu erhalten, welche Daten hierbei konkret geändert werden müssen. Folglich korrelieren die Änderungen und der damit verbundene Arbeitsaufwand mit dem Anteil der Erfahrung und Ausbildung des Werkers. Je nach Qualität des Simulationsmodells sind auch die detailgetreue Materialabtragssimulation sowie Kollisionserkennung für den Nutzer nachvollziehbar dargestellt. Insgesamt werden die Simulationsmodelle zweckmäßig entwickelt und fokussieren häufig nur die Fertigungsoperationen an sich, d. h. die Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück unter Anwendung realer Steuerungskomponenten. Dabei werden jedoch bestimmte Sachverhalte wie das Werkzeugpositionieren als Prozess sowie die Folge einer Werkzeugpositionierung für die Fertigung nicht zurückgemeldet¹⁴, was natürlich an der Festlegung der Hauptanforderungen der Simulation liegt, bei der das Werkzeugmagazin nicht im Fokus der Priorität liegt.

2.1.2 Grenzen bei der Überprüfung der NC-Programme

Während der Überprüfung von NC-Programmen durch moderne Simulationsprogramme wird auf ungewollte Kollisionen hingewiesen und die geschätzte Fertigungszeit durch das

¹⁴ Diese Nebenbereiche einer Werkzeugmaschine sind in dem Simulationsmodell z. T. nicht für Test- und Überprüfungszwecke modelliert.

Simulationsprogramm errechnet¹⁵. Somit ist es Stand der Technik, mithilfe von Simulationswerkzeugen und einer CAD/CAM-Verarbeitung ein NC-Programm zu erhalten, das unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Maschinengeometrie sowie der Relativbewegungen von den Maschinenachsen verifizierbar ist (vgl. [DVM16-01]). Eine besondere Herausforderung ist hierbei die Materialabtragssimulation, um die Fertigung in der Simulation so präzise wie möglich darzustellen. Dabei wird das NC-Programm sehr häufig durch eine Steuerungsnachbildung oder durch eine echte Steuerung abgearbeitet und die Befehle visuell dem Nutzer in Form von Maschinenbewegungen und Fertigungsoperationen dargestellt. Dabei kann jedoch nicht überprüft werden, ob die Werkstückposition auch wirklich sinnvoll¹⁶ gewählt wurde – die Rückmeldung erfolgt binär im Sinne von „valide“ oder „invalide“, angezeigt durch Fehlermeldung oder durch z. B. Markierung im visuellen Arbeitsbereich der Simulationsumgebung. Der Simulationsprozess sieht vor, dass nach der Meldung einer unvorteilhaften Werkstückposition, wie z. B. bei Kollisionen, das Bauteil und die Spannmittel (digital) verschoben werden¹⁷, meistens durch die Eingabegeräte des Nutzers. Zwar können mittels NC-Pfad-Simulation NC-Korrekturen vorgenommen werden (vgl. [ABW+05]), jedoch beziehen sich diese nur auf Korrekturen unabhängig von der Aufspannung oder der Anpassung der Lage von Werkstück und Spannmittel. Diese automatische Korrektur muss zwangsläufig durch das verwendete Softwareprodukt zur Verfügung gestellt werden, was nicht unbedingt gegeben ist.

Die durch NC-Programm-Generatoren zu fahrenden und ggf. optimierten Bahnkurven schaffen dabei ebenfalls keine Abhilfe, da die allgemein eingesparte Zeit z. B. durch umständlichere Verfahrswege oder resultierendes Umspannen des Werkstücks aufgehoben wird. Des Weiteren kann eine umständliche Aufspannlage nach wie vor zu ungewollten Kollisionen im Arbeitsraum der Maschine führen.

Damit ist auch der Nutzer in der Verantwortung, durch mehrmaliges Probieren eine „bessere“, d. h. zeitsparende und kollisionsfreie Aufspannposition zu finden und ggf. das NC-Programm anzupassen oder einen Anpassauftrag anzulegen und an die richtige Stelle der Organisation¹⁸ zu übergeben. Konkret heißt das, dass jede Veränderung durch den Nutzer zur Folge haben kann, dass das NC-Programm individuell (wenn möglich) direkt in der Simulationsumgebung oder in der CAM-Umgebung verändert werden muss. Bei der Überprüfung einer hohen Anzahl von Aufspannmöglichkeiten und Einstellvarianten kann dieser Prozess sehr arbeitsaufwendig werden. Auch beinhaltet dieses Vorgehen weitere

¹⁵ Die Verfügbarkeit der Funktionen, wie z. B. die Rückmeldung von Fertigungszeiten, kann je nach Art und Umfang der verwendeten Software abweichen.

¹⁶ Der Begriff *sinnvoll* kann an eine Zieldefinition gekoppelt werden: Eine sinnvolle Werkstückpositionierung ist dann sinnvoll, wenn die Lage kollisionsfrei ist und sich auf Basis der Koordinatenwahl zeitreduzierend auswirkt, was bei dem Simulationsmodell nicht standardgemäß gegeben ist.

¹⁷ Die Verwendung eines alternativen Spannmittels in Form eines 3D-Modells ist ebenfalls denkbar, was durch den Nutzer getestet werden muss.

¹⁸ Organisation bezeichnet eine Tätigkeit oder einen Prozess des organisatorischen Gestaltens (Methodik und Techniken des Organisierens) sowie das Ergebnis der Gestaltung. Aus organisationstheoretischer Sicht gibt es hierzu drei Grundverständnisse, wobei das Unternehmen, Behörden, Krankenhäuser, Hochschulen u. Ä. der institutionalen Organisation zugeordnet werden, bei der verschiedenartige arbeitsteilige Handlungssysteme zusammenfließen. (vgl. [Gab88] und [FGH+08])

Fehlerquellen, wie z. B. das Verstellen und Überschreiben des Nullpunkts, sollte dieser kontinuierlich neu angepasst werden. Eine damit verbundene oder erzeugte Simulationsanhäufung durch das Überprüfen vieler Daten als Einzelsimulation ist ebenfalls als problematisch und ressourcenbindend zu bewerten. Die NC-Programmanpassung bei Verdrehung oder Werkstückneigung im Arbeitsraum der Maschine oder bei Orientierungsänderungen auf dem Maschinentisch ziehen aufwendige Anpassarbeiten am NC-Programm nach sich. Dies ist insbesondere dann unvorteilhaft, wenn Programme für Produkte mit komplexer Zielgeometrie verwendet werden, bei denen nicht alle Regeln bzgl. der Verarbeitung von steuerungsherstellerspezifischen Zyklen bekannt sind. Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Überprüfung von Werkstückpositionen und der damit verbundenen Überprüfung der NC-Programme ist, dass Werkstückpositionierungskoordinaten, die eindeutig die Position des Werkstücks im Arbeitsraum der Maschine definieren, bereits in vorangegangenen Experimenten und Einrichtverfahren getestet wurden, jedoch wurde dem zuständigen Mitarbeiter dieses Wissen nicht zur Verfügung gestellt. Für eine Bereitstellung von Wissen in Form von Dokumentationen über Fertigungstechnologien für die Werkstattfertigung, die auch das Einrichten von Maschinen und die Überprüfung von NC-Programmen subsumiert und für ein definiertes Produktspektrum fungiert, stellt bspw. der Ansatz von *Kreppenhof* et al. [KLT01] eine Technologieplanungsmethode zur Verfügung. In dem Ansatz werden Produktdatenmodelle mit einer Wissensbasis gekoppelt. Ansätze wie von *Kreppenhof* et al. (vgl. [KLT01]) zeigen in diesem Zusammenhang, dass ein Wissensmanagementansatz gerade in akademischen Bereichen ein wichtiger Punkt ist, jedoch noch immer Defizite im Transfer zu realen Anwendungsbezügen vorhanden sind.

Die vorangestellten Gegebenheiten, die die Überprüfung von NC-Programmen erschweren, setzen in der Regel ein iteratives Vorgehen durch die Durchführung von Versuchsreihen voraus, bei denen das NC-Programm nach jeder Aktualisierung der Parameter (z. B. Anzahl an ungewollten Kollisionen = 0 und verbundene aktualisierte Aufspannkoordinaten) mittels Simulationsdurchgängen überprüft wird. Diese empirisch gearteten Vorgehen können durch statistische Versuchsplanungsmethoden bis zu einem bestimmten Grad insofern sinnvoll sein, wenn die Aufwendungen zur Durchführung der Experimente¹⁹ in einem überschaubaren Rahmen gehalten werden, d. h. eine manuelle Durchführbarkeit möglich ist. Hierzu sind insbesondere die klassischen Versuchsplanungsmethoden aus der statistischen Versuchsplanung (*Design of Experiments, DOE*), wie z. B. *2k-Faktoren-Design, fraktionelle Design, RSM, EVOP* sowie *Plackett-Burman-Versuchspläne* (vgl. [Mon13] und [LaKe91]), zu nennen. Neben den bereits etablierten Verfahren der statistischen Versuchsplanung wird versuchsbasierte Simulation mit verschiedenen Optimierungsmethoden kombiniert (vgl. [MKR+11], [VDI3363]), was in der praktischen Anwendung auch zu rechenintensiven Verfahren führen kann.

Das Problem bei dem empirisch basierten Vorgehen, aus einer Grundgesamtheit eine Stichprobe zu entnehmen und daran die NC-Programme via Simulation zu überprüfen,

¹⁹ Erprobung einzelner Aufspannparameter.

schlägt sich, wie bereits angedeutet, in der Menge der Aufspanndaten und den damit verbundenen Simulationsdauern nieder. Das Problem der Verarbeitung von (sehr großen) Datenmengen ist bekannt, und dem wird durch Parallelisieren von Rechereinheiten oder bestimmte Architekturlösungen entgegengewirkt. Im Bereich der Fertigungssimulation sind das Auslagern und Verteilen von rechen- und arbeitsintensiven Validierungsläufen über die lokale Rechnerressource hinaus denkbar, wenn davon ausgegangen wird, dass in einer Organisation die Rechnerressourcen vorhanden und nicht voll ausgelastet sind. Denkbar wäre dafür das Szenario, dass Mitarbeiter, die die vorgeschriebenen Pause-Zeiten einhalten und währenddessen die Arbeitsmittel „Rechnerressourcen“ im „Stand-by-Modus“ sind, diese Ressourcen jedoch vorübergehend genutzt werden könnten, um Simulationen und Berechnungen auszuführen. Auf Basis einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie²⁰ aus dem Jahr 2012 zum Thema „IT-Sicherheitsniveau in kleinen und mittleren Unternehmen“ (vgl. [Bun12]) kann festgestellt werden, dass 96 % der KMUs PC-Arbeitsplätze mit Internetzugang aufweisen. 40 % weisen eine Ausstattung mit Client-Server-Architekturen aus und 88 % eine Ausstattung mit mobilen Endgeräten (vgl. [Bun12]). 98 % der Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien werden für E-Mails, 80 % für Online-Banking, 75 % für kaufmännische Softwaresysteme, 60 % für Datenaustausch zwischen Kunden und Lieferanten und 10 % für Cloud-Computing verwendet (vgl. [Bun12]). Daraus kann geschlossen werden, dass die PC-Arbeitsplätze unter Ausstattung moderner CPUs und Betriebssystemen einen geringen Anteil ihrer Performance und damit auch der Ressourcen zur Berechnung komplexer Sachverhalten nutzen – das Potenzial kann damit als verschwendet eingestuft werden. Aus Sicht der KMUs entstehen zudem 81 % der IT-Probleme aufgrund von Technikausfall, womit unweigerlich auch die Überprüfung von NC-Programmen sowie die Nutzung von Simulationsmodellen (als computergestütztes Werkzeug) eingeschränkt werden (vgl. [Bun12]). Aufgrund dieser Zahlen lassen sich Ansätze bestärken, die Validierungsvorgänge auch im Bereich der NC-Programme und die damit verbundene Simulation auf ungenutzte Rechnerressourcen auszulagern, was noch nicht ohne hohen Aufwand gegeben ist. Durch die Verteilung auf Rechnerressourcen könnte auch dem Problem des Technikausfalls entgegengewirkt bzw. dieses abgeschwächt werden, indem auf Ersatzressourcen zurückgegriffen wird. Ein Beispiel für das kollektive Berechnen und Datenauswerten ist das Projekt „*SETI@home*“. „*SETI@home*“ ist ein wissenschaftliches Experiment, welches mit durch das Internet verbundenen Computerressourcen die Suche nach außerirdischer Intelligenz durchführt (vgl. [Set16-ol]). Jeder Teilnehmer nutzt seine Rechnerressource, um im Dienst des Experiments Radioteleskopdaten herunterzuladen und auszuwerten. Das ist für die Computerressourcen der privaten Haushalte wenig aufwendig, da die einzelnen Computerressourcen jeweils einen sehr geringen Teil der Berechnung übernimmt, jedoch in absoluter Summe die limitierten Computerressourcen eines einzigen Forschungsinstituts (oder mehrere wenige), das große Serverlandschaften einrichten müsste, unterstützt (vgl. [Hip16-ol]). Nach diesem Vorbild könnten Ausfälle der IT-Infrastruktur sowie ungenutzte Rechnerressourcen einer unternehmerischen Organisation

²⁰ Heute umbenannt zu Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

den Aufwand der NC-Programmüberprüfung für die Arbeitsvorbereitung effizienter nutzen, was in der heutigen Zeit ebenfalls nicht die Regel ist. Ein Kritikpunkt von Seiten der adressierten Unternehmen ist der Datenschutz und die IT-Sicherheit an sich, sodass sich hierbei erst einmal auf interne (interorganisatorische) Lösungen, unabhängig davon, wie diese konkret gestaltet sind, beschränkt werden sollte.

Auch nach einer umfangreichen Analyse und Überprüfung des NC-Programms durch die Simulation bleibt der Status quo im Rahmen der Einfahrprozesse dennoch unverändert, da ein neues Werkstück, insbesondere dann, wenn das Werkstück noch nie gefertigt wurde, nicht mit maximaler Geschwindigkeit spanend verarbeitet wird. Der Grund dafür ist der, dass im Schadensfall bzw. bei einer bevorstehenden Kollision die Werkzeugmaschine durch die menschliche Reaktion zu stoppen ist, ohne dabei das Risiko für weitere Schäden zu erhöhen. Auch verbleiben die Rüstprozesse von Spannmitteln, Rohteilen und Werkzeugen konstant. Diesen Umständen kann durch die zunehmende Sicherheit valider NC-Programme und verbesserte Aufspannkonfigurationen²¹ entgegengewirkt werden und damit die Grenzen der Überprüfbarkeit von NC-Programmen reduziert werden.

Bislang basiert die Gütebeurteilung der NC-Programmierung auf der technologischen Machbarkeit zur Erreichung der Zielgeometrie unter Beachtung von fertigungstechnischen Randbedingungen. In arbeitspraktischen Fällen wird das NC-Programm mittels Simulationen überprüft, ob Kollisionen vorhanden sind und die Zielgeometrie erreicht wird. In der realen Fertigung wird das übertragene NC-Programm mit langsamen Vorschüben ausgeführt. Dabei werden die Aufwendungen, die bei der NC-Programmkorrektur erforderlich sind, nicht zur Gütebeurteilung herangezogen. Die Mehrarbeit durch mangelhafte NC-Programme schlägt sich im operativen Betrieb durch gebundene menschliche, anlagentechnische und zeitliche Ressourcen wieder und wird nur am Rande durch steigende Routine, Personaleinsatz und organisatorische Maßnahmen verbessert, jedoch nicht weiter erfasst oder zur Erreichung brauchbarer und damit ressourcenschonender NC-Programme herangezogen, um die Arbeitsvorbereitung dahingehend zu verbessern. Dabei werden auftretende Änderungen am NC-Programm als solche nicht hinsichtlich der Folgen für auftretende umständliche Maschinenwege, Fertigungsdauern oder des Konfigurierens diverser Steuerungszyklen hinterfragt oder reflektiert.

2.1.3 Grenzen bei der rechnergestützten Anpassung der NC-Programme

Die rechnergestützte Anpassung der NC-Programme kann, insb. bei kleinen Änderungen, direkt in der Simulationsumgebung erfolgen oder in der CAM-Umgebung. Diese Änderungen erfolgen manuell²², was bei komplexen NC-Programmen Fehlerquellen beinhaltet. Auch sind herstellereigene NC-Zyklen, die zur Fertigung von komplexen Geometrien verwendet werden, nicht eindeutig und direkt ersichtlich dargelegt, sodass eine

²¹ Das Wissen und die Erprobungsergebnisse werden langfristig gesammelt und zur Verfügung gestellt.

²² Manuell heißt hier durch die händische Eingabe am Endgerät.

manuelle Änderung²³ nicht ohne Weiteres möglich ist. Das bedeutet auch, dass es dem Nutzer, insbesondere bei geringer Arbeitserfahrung mit NC-Programmen, erschwert ist, bestimmte (fehlerhafte) Fertigungsprozesse aus der Simulation (Visualisierung) dem entsprechenden NC-Satz zuzuordnen. Dabei ist es ebenfalls erschwert, die Fehlerursache konkret zu identifizieren und gezielt eine wirksame Veränderung vorzunehmen, sollte bei der Simulation oder der Fertigung ein Fehler auftreten (z. B. Kollision), ohne dass dabei zweifelsfrei auch eine direkte Lösung zu erkennen ist (durch Rekonfiguration der Parameter des eventuell betroffenen NC-Satzes). In der Regel sind hierfür ein hoher Erfahrungsschatz und ein hohes fachliches Wissen bzgl. der Simulationsabläufe und des Modells zwingend notwendig. Des Weiteren müssen dem Bediener dabei die Zusammenhänge zwischen der Simulation und den Auswirkungen auf die NC-Programme sowie Zusammenhänge zwischen Maschinenverhalten, Fehlermeldung und NC-Programm bekannt sein, was ebenfalls Erfahrung und ein hohes Fachwissen voraussetzt.

Diese genannten Problemstellungen und verbundenen Herausforderungen für den Werker treten z. B. bei jeder Aufspannanpassung eines Werkstücks in Form einer translatorischen oder rotatorischen Koordinatenveränderung auf, ohne dass dabei die direkte Auswirkung auf den Fertigungsprozess zurückgegeben wird. Es entsteht dabei immer der Umstand, dass die neuen Konfigurationen einzeln simuliert werden müssen – d. h. auch für jedes Maschinenmodell separat. Auch wird nicht bei jeder Anpassung ausgegeben, welcher NC-Befehl konkret verändert werden muss. Konkrete Änderungsregeln wurden dazu nicht definiert, und die Änderungen und die Gewährleistung zur Erbringung von funktionstüchtigen NC-Programmen sind den Nutzern überlassen. Steuerungsspezifische Programmierhandbücher²⁴ erläutern zwar die Funktionen einzelner Befehle, geben jedoch keine Hinweise auf (ökonomische und nicht-umständliche) Änderungsempfehlungen bzgl. der Programme im Ganzen und Programmsätze im Einzelnen bei einer translatorischen oder rotationspezifischen Koordinatentransformation (Werkstückpositionierung).

Auch hierzu gibt es bereits erste Ansätze, diesem Problem mithilfe eines wissensbasierten, teilautomatisierten Fertigungsprozessplanungswerkzeugs zu begegnen. Dazu bieten *Fischer* und *Gathmann* [FiGa09] das sog. *Feature-Based Machining* (merkmalsbasierte Fertigungsplanung) an. Mithilfe dieses Ansatzes werden teilautomatisiert NC-Programme auf Grundlage einer durchgängigen CAD-/CAM-Kette erstellt. Bestimmte CAD-Features, die wiederkehrend sind und in der Regel in dem Arbeitsprozess neu verwaltet werden müssen, können hierbei um fertigungsrelevante Informationen ergänzt werden. Des Weiteren ist eine Erweiterung um geeignete Bearbeitungsstrategien möglich, die in einer Bibliothek gesammelt und für die zukünftige Nutzung bereitgestellt werden (vgl. [FiGa09]). Jedoch besteht hier die Kritik, dass die Bibliothek mit sinnvollen Bearbeitungsstrategien gefüllt wird, diese verwaltet werden und auf dem aktuellen Stand

²³ Die herstellereinspezifischen Befehle für die Definition von NC-Zyklen lassen den Verlauf der Bahnkurve des Werkzeugs nicht auf den ersten Blick erkennen. Zudem sind die angefahrenen Koordinaten, die zwischen Anfangs- und Endpunkt liegen nicht erkennbar, sodass eine manuelle Änderung an diesen Befehlen keine Sicherheit ohne eine erneute Simulation gewährleistet.

²⁴ Die Steuerungshandbücher werden in der Regel vom jeweiligen Steuerungshersteller herausgegeben.

gehalten werden müssen. Dies führt bei einer hohen Stückzahl und einer hohen Variantenvielfalt²⁵ zwangsläufig zu einem hohen Verwaltungsaufwand. Dadurch können diese Bibliotheken und damit auch die Wissensbasis intransparent werden, was auch negative Auswirkungen auf die Gestaltung des Fertigungsprozesses haben kann – speziell bei wenig erfahrenen Mitarbeitern (Werker, Planer) einer Organisation.

Auch die teilautomatisierte Anpassung und Erstellung von NC-Programmen geben keine Garantie für die automatisierte Verbesserung bzw. Anpassung der Programme an unterschiedliche Aufspannoptionen. Hierzu wurde in dem Beitrag von *Eversheim* (vgl. [Eve97]) verdeutlicht, dass die Ziele des Einsatzes von EDV-Systemen im Allgemeinen und CAD-/CAM-Systemen mit NC-Modul und Simulationsmodellen im Besonderen die Einfahrzeiten der Werkzeugmaschine senken. Die Programmierzeiten werden reduziert und gleichzeitig die Vereinfachung der Programmierung komplexer Geometrien ermöglicht sowie die Reaktionszeiten auf Veränderungen an Produkten verringert. Die Generierung fehlerfreier NC-Programme kann jedoch nicht vermieden werden. (vgl. [Eve97] S. 237) Eine Überprüfung ist damit kontinuierlich notwendig (manuell, durch den Planer). Insbesondere liegt das Ziel der EDV-Systeme nicht darin, optimierte NC-Programme zu produzieren (vgl. [Eve97] S. 237), was im Rahmen der Arbeitsvorbereitung hinsichtlich der Aufspannpositionierung und Maschinenrüstung wünschenswert wäre und bis heute ein Problem darstellt, wenn die Softwareprodukte betrachtet werden, bei denen auftragsnah keine automatische Anpassung und Validierung von NC-Programmen erfolgen (keine direkte Rückkopplung und Ansteuerung bei Veränderungen).²⁶

Auch *Eversheim* (vgl. [Eve97]) bestätigt bereits in den späten 1990er-Jahren, dass eine NC-Programmoptimierung mittels modellbasierter Darstellung der geometrischen Daten des bevorstehenden Fertigungsprozesses iterativ durch das aktive „Tun“ des Planers erfolgt. Zu dieser Zeit wurde allerdings von „leistungsfähigen Systemen“ gesprochen, was in der heutigen Zeit bedeutet, dass Standardarbeitsplatzrechner in der Lage sind, diese Aufgaben der iterativen NC-Programm-Optimierung ohne Probleme durchzuführen [DVM16-ol]).²⁷ Dies bestätigt demnach auch, dass das heutige iterative Optimieren der

²⁵ Hohe Stückzahlen und eine hohe Variantenvielfalt können bei einer Werkstattfertigung durch die einzelnen verschiedenartigen Kundenaufträge auftreten. Mit Stückzahl ist nicht das Los gemeint, sondern die Stückzahl der Regeln und Informationen, die bei jedem Produkt anders sein können und in einer solchen Bibliothek verwaltet und gespeichert werden.

²⁶ Des Weiteren gibt es noch keine technisch umgesetzte Rückkopplung, die ein Feedback über die jeweilige Güte der eingestellten Einrichtparameter für die jeweilige Maschine liefert oder eine Aussage darüber ermöglicht, wie die Güte des genutzten NC-Programms aus einer Menge zur Verfügung stehender NC-Programme und die Güte der Aufspannposition zu bewerten sind. Allgemein wurde also nie definiert, was ein optimales NC-Programm und eine optimale Aufspannposition des Werkstücks hinsichtlich bestimmter fertigungsrelevanter Zielkriterien ausmacht. Es kann auch nicht gewährleistet werden, dass die Simulationsmodelle, die die Validierung der NC-Programme und der Fertigungseinrichtung übernehmen, eine adäquate Rückmeldung geben, die eine Überprüfung verschiedener Werkstück- und Werkzeugpositionen zulässt – dies steht allgemein nicht im Fokus der Anforderungen an das Simulationswerkzeug, sondern vielmehr die korrekte Darstellung und das Verhalten der Maschinenkinematik, der Materialabtrag sowie die Kollisionserkennung.

²⁷ Simulationsprogramme sind lokal auf dem Rechner installiert und können in einer Instanz gestartet werden, ohne lange Ladezeiten in Kauf zu nehmen.

NC-Programme durch den Arbeitsprozess des Nutzers, genauer den Bedienprozess der Softwarekomponenten erfolgt. Das Ziel, die Zykluszeit zu reduzieren und/oder umständliche Werkzeugwege zu vermeiden, bringt also einen langwierigen Suchprozess mit sich, wenn dabei jede Aufspannlage eines Fertigungsszenarios in jeder Instanz nur einmal ausgeführt werden kann, bis die Simulation durchgelaufen ist (vgl. Anwendung durch [DVM16-ol]).

2.1.4 Anforderung an eine Methode zur Werkstückpositionierung

Die erste Anforderung ergibt sich aus dem Anspruch an die Generierung valider Werkstückpositionen auf dem Maschinentisch, bei der die Fertigung kollisionsfreie Fertigungsprozesse beinhaltet. Die Überprüfung soll dabei automatisch nach Eingabe eines Auftrags durch die Nutzerschnittstelle erfolgen oder kann manuell durch den Nutzer gestartet werden.

Die überprüften NC-Programme müssen auch in modifizierter Form zu validen Aufspannergebnissen führen, die in der Datenhaltung auch hinterlegt werden. Die Aufspannkoordinaten müssen so gebildet werden, dass das Aufspannen des Werkstücks inklusive Spannmittel auf dem Maschinentisch möglich ist. Um ein Werkstück in der virtuellen Welt anordnen zu können, müssen Koordinaten definiert werden, die die Werkstückposition im Arbeitsraum der (realen) Maschine repräsentieren und auch in die Simulationslandschaft überführbar sind – d. h., eine maschinelle Verarbeitung muss ganzheitlich gewährleistet sein, da der Nutzer in der Regel nicht mehr direkt über die visuelle Darstellung einbezogen wird.

Die erzeugten Aufspannkoordinaten für die Werkstückpositionierung sollen neben dem Zustand der validen Fertigungsdurchführung eine Zykluszeitreduzierung mit sich bringen. Dabei soll bei dieser bestenfalls eine Minimierung erreicht werden. Die Variation der Positionen wird dabei einen Einfluss auf die Haupt- und Nebenzeit anstreben, da dies durch veränderte Positionen und damit veränderte Verfahrswege sinnführend ist.

Zudem können die Aufspannkoordinaten aus der translatorischen Variation in die jeweiligen Koordinatenrichtungen sowie die Änderung des Orientierungswinkels dafür Sorge tragen, dass umständliche Umspannvorgänge oder auch Maschinenwege vermieden werden. Jedoch ist dies zunächst zweitrangig zu betrachten, da die kollisionsfreie und zykluszeitreduzierende Aufspannung fokussiert wird und diese mit noch keiner direkten qualitativen Rückkopplung über die Güte der Koordinaten verbunden ist.

Die Aufspannkoordinaten in der Ebene²⁸ sind auf zwei Dimensionen beschränkt. Für die Höheneinstellung²⁹ und Werkstückorientierung sind zwei weitere Dimensionen erforderlich. Die Anzahl der Cluster, in die die Aufspannkoordinaten unterteilt sind, soll sich an

²⁸ Die Ebene ist hierbei die Maschinentischoberfläche, auf den das Werkstück aufliegt und translatorisch variiert wird. In der Regel ist die xy-Ebene dabei vorgegeben.

²⁹ Die Höhenvariation im Zuge der z-Richtung als Veränderliche ist sekundär betrachtet, grundsätzlich aber möglich.

der Anzahl der zur Verfügung stehenden ansteuerbaren Simulationsmodelle (Ressourcen), auch Maschineninstanzen genannt, orientieren. Dabei haben die Cluster keinen Einfluss auf das Reduzierungsergebnis der Zykluszeit selbst, sondern stellen nur die Anzahl an *Simulations-Jobs* für die laufende Koordinatenüberprüfung dar. Die Orientierungsänderung kann dabei gesondert oder in Kombination mit der translatorischen Koordinatenänderung verwendet werden.

Mit einhergehender Variation der Aufspannkoordinaten ist im Zuge zu gewährleisten, dass das NC-Programm automatisch an den neuen Situationen angepasst wird, um nicht zusätzliche ungünstige Parameter zu generieren, die die Fertigung stören und die Realisierbarkeit gefährden. Dabei sollen die generierten Positionskordinaten im Zuge der Werkstückpositionierung möglichst so gewählt und verifiziert werden, dass keine zusätzlichen umständlichen Umspannprozesse³⁰ generiert werden. Die Überprüfung verschiedener Aufspannsituationen soll zudem automatisch erfolgen, ohne dass ein Planer an einen (Büro-)Arbeitsplatz (Desktop-Rechner) gebunden wird.

Eine Datenschnittstelle zur elektronischen Verarbeitung der Aufspannkoordinaten für die Werkstückpositionierung und die automatisierte Datenverarbeitung sollte gewährleistet sein. Zudem ist eine Datenhaltung notwendig, die die ursprünglichen Koordinaten und die modifizierten Koordinaten speichert und eine Redundanzüberprüfung vornimmt, damit bereits generierte Aufspannkoordinaten im Zuge eines hohen Datenaufkommens an Zykluszeitreduzierungs- und Validierungssuchläufen mit zugehörigen Koordinaten nicht mehrfach generiert und geprüft werden.

Zudem ist eine web- und kollaborationsbasierte Benutzerschnittstelle (vgl. Kapitel 2.3) notwendig, die gewährleistet, dass der Nutzer online von verschiedenen physikalischen Orten mithilfe eines Endgerätes auf die (rechnergestützte) Werkstückpositionierung zugreifen kann. Die Aufspannkoordinaten und deren Überprüfung sowie das resultierende NC-Programm sind mit einem regulären Fertigungsauftrag verknüpft. Hierbei ist die Fertigungsplanung ebenfalls angeknüpft, die in der Regel auch mit den identischen Aufträgen verbunden ist, wodurch die Arbeitsvorbereitung (insb. Arbeitsplanung) sinnvoll durchgeführt werden kann. Dadurch kann auch der Werker in der Rolle des Maschinenbedieners in der realen Fertigung die ermittelten Koordinaten zweifelsfrei entgegennehmen, und ein zusätzlicher Verwaltungsaufwand bzgl. der Koordinaten und deren Überführen in die reale Maschine kann vermieden werden. Eine unkonkrete Werkzeugpositi-

³⁰ Umspannprozesse lassen sich nicht gänzlich vermeiden, da diese auch von der Zielgeometrie abhängen. Wenn z. B. bei einem Rohteilquader auf jeder Seite eine Lochung angebracht werden soll, dann ist ein Umspannen unumgänglich, sollte die Maschine nur über drei bis vier Seiten die Flächen erreichen. Einen weiteren Einfluss hat das zur Verfügung stehende Spannmittel, insb. die geometrischen Zustände des Spannmittels, das je nach Größe und Form bestimmte Zugänge für das Werkzeug versperren kann. Hier wird davon ausgegangen, dass für jede Werkstückseite, die an einem Bauteil zu bearbeiten ist, ein dafür vorgesehenes NC-Programm (oder Unterprogramm) zur Verfügung steht. Diese Unterprogramme werden demnach wie Einzelaufträge behandelt und auch einzeln simuliert (validiert). Die Simulation bildet das Umspannen generell nicht ab, sodass dies technisch nur als „neuer Auftrag“ behandelt wird.

onierung, meist durch Defizite in Kommunikation und Information, und die dadurch resultierende mögliche Fehlmessung und Anwendung der ermittelten validen Aufspannsituationen werden ausgeräumt.

Die Zykluszeitreduzierungsansatz soll ein schnelles Konvergenzverhalten aufzeigen, und die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe soll reduziert und gering gehalten werden – zeitintensive Suchverfahren werden dadurch vermieden. Dadurch kann gewährleistet werden, dass, ohne lange Wartezeiten zur Identifikation valider Aufspannkoordinaten, verbesserte NC-Programme zur Verfügung stehen, die insgesamt zu einer reduzierten Zykluszeit führen. Damit erhält der Ansatz das Potenzial, während der operativen Geschäftszeit von unternehmensähnlichen Organisationen anwendbar zu sein, und es muss nicht auf häufig über Nacht dauernde Rechenzeiten zurückgegriffen werden.

2.2 Zykluszeitreduzierende Werkzeugpositionierung

Die Positionierung von Werkzeugen in einem Werkzeugmagazin von Werkzeugmaschinen ist wegen der erforderlichen Rüstvorgänge während der Maschineneinrichtung eine wichtige Planungsaufgabe und damit ein nicht zu vernachlässigender Teil der Arbeitsvorbereitung. Die meist zufällige Werkzeugpositionierung durch den Werker kann zu einer längeren Einrichtung und dadurch längeren Bearbeitungszeit (und Zykluszeit) insgesamt führen. Werkzeugwechsel können häufiger vorkommen als eigentlich geplant, oder die Werkzeuge nutzen sich unkontrolliert durch die Positionierung (indirekt) ab.

Definition 10: Werkzeugpositionierung

Unter Werkzeugpositionierung wird hier die Positionierung von Werkzeugen in einem Werkzeugmagazin einer Werkzeugmaschine verstanden. Dabei werden die Werkzeuge auf Werkzeugmagazinplätze verteilt. Die Positionierung steht dabei in keiner Abhängigkeit von der Ausprägung der Magazinart. Begriffe wie Werkzeugmagazinbestückung, Werkzeugallokation sowie (Werkzeug-)Anordnungsfolge sind synonym verwendbar.

Mit dem Begriff Werkzeugpositionierung ist nicht die Werkzeug-zu-Werkzeugmaschinenzuordnung gemeint (vgl. [RaAd96], [GSS93], [VUB92] oder [AMR92]), sondern die Positionierung auf konkreten Magazinplätze, bezogen auf ein oder mehrere aufeinander folgende NC-Programme unter Kenntnis der Reihenfolge der Werkzeugwechselbefehle auf Basis der zur Verfügung stehenden NC-Programmen. Bei der realen Umsetzung ist es Stand der Technik, dass die Bearbeitungsfolge in Form einer Werkzeugwegoptimierung geplant wird, was durch die Zyklusbeschreibung bzw. durch die Schnittstrategie erfolgt (vgl. [Eve97] S. 238f.). Dazu gehört auch, dass die Anzahl der Werkzeugwechsel „optimiert“ wird. Das heißt, dass gleichartige Werkzeugoperationen mit bereits eingewechseltem Werkzeug erfolgen können und keine umständlichen Werkzeugeingriffe erfolgen. Wenn zum Beispiel eine Nut gefräst werden soll und im Anschluss an einer anderen Fläche des Werkstücks vier gleichartige Bohrungen erfolgen sollen, dann würden

die Schnittstrategie und die Werkzeugwechselzahl so angepasst werden, dass die Nut gefräst wird, danach der Werkzeugwechsel (Bohrwerkzeug) erfolgt und die vier Bohrungen vorgenommen werden. Umständlich und ungünstig wäre hierbei eine Schnittstrategie, bei der z. B. beim Anbringen von zwei Bohrungen ein anschließender Werkzeugwechsel erfolgt (Fräswerkzeug) mit nachfolgendem Fräsen der Nut und abschließend ein erneuter Werkzeugwechsel zum Bohrwerkzeug mit anschließender Anbringung der verbleibenden zwei Bohrungen. Vielmehr ist es problematisch, eine brauchbare Werkzeug-zu-Werkzeug-Platzzuordnung vor der Fertigung zu identifizieren, ohne dass lange Magazinrotationen oder Fertigungsunterbrechungen erfolgen, wenn das Werkzeug nicht vorhanden ist oder die Werkzeugmagazinkapazität nicht ausreicht.

2.2.1 Grenzen bei der Darstellung der Werkzeugpositionierung durch Simulation als Testumgebung

Bei marktüblichen Simulationswerkzeugen zur Überprüfung des NC-Programms, der Kollisionsüberwachung sowie der Validierung der Fertigungsprozesse und der Fertigungszeit stehen, bezogen auf die Werkzeuge, nur der Materialabtrag sowie die Sicherheitsabstände im Fokus der Überprüfung. In der grafischen Nutzeransicht werden die Werkzeuge ggf. in einem Magazin angezeigt. Aus programmiertechnischer Sicht sind die Werkzeuge mit bestimmten IDs sowie den Geometriedaten über eine Schnittstelle an bestimmte Plätze in der grafischen Umgebung der virtuellen Werkzeugmaschine definiert. Dabei spielt die Positionierung im Magazin eine untergeordnete Rolle. Auch bieten die Simulationswerkzeuge keine Rückkopplung der Werkzeughandhabungszeiten oder Werkzeugwechselprozesse. Auch das Einrüsten einer Maschine und die damit verbundene Arbeitszeit werden von den Softwarewerkzeugen nicht erfasst. Um eine Reihe von nacheinander folgende NC-Programme zu validieren, wäre es durchaus interessant, die Auswirkung der Werkzeugpositionierung im Magazin und die damit auftretenden Wechselzeiten messbar zu machen. Damit bestehen Chancen, Anteile der Zykluszeit zu verringern sowie eine nachhaltige Magazinbestückung vorzunehmen. In aktuellen Simulationswerkzeugen werden bestenfalls die Standzeiten erfasst, indem die Werte fest einprogrammiert werden und stetig nachgepflegt werden müssen. Dies ist ein mühsamer Verwaltungsaufwand und erfordert in der Praxis einen weiteren Verwaltungsprozess, insb. beim Beschaffen sowie Austausch von Werkzeugen.

Definition 11: Standzeit

Als Standzeit wird die Zeit verstanden, in der die Schneide eines Werkzeugs durch die Zerspanprozesse arbeitsfähig bleibt. [DiTs14]

2.2.2 Grenzen bei der Überprüfung der Werkzeugpositionierung

Ebenfalls gibt es Möglichkeiten, Bahnkurven bei virtuellen Werkzeugmaschinenmodellen zu verbessern, um fertigungsrelevante Zeiten zu reduzieren. Dazu gibt es z. B. den

Ansatz von Afifi et al. (vgl. [AHK11]), der die Bearbeitungsschritte segmentiert und für Multiwerkzeugköpfe rekombiniert, wodurch sich weniger Werkzeugwechsel ergeben und die Nebenzeiten bzw. auch die Zykluszeit sinkt. Die erfolgreiche Umsetzung liegt in der Verwendung von Multiwerkzeugköpfen, was nicht immer vorausgesetzt werden kann. Bei den Ansätzen wird das Problem zur Verbesserung der Fertigung durch optimierte Bearbeitungsparameter sowie verkürzte Haupt- und Nebenzeiten adressiert, jedoch fehlen hierzu generell Aussagen, inwiefern sich diese Verbesserungen im Rahmen einer virtuellen Fertigung auf das reale Maschinenverhalten auswirken. Auch ist durch die Verbesserung der Bearbeitungsparameter nicht sichergestellt, wie sich z. B. Werkzeugstandzeiten oder Werkstoffe der Werkzeuge und Werkstücke im Zuge der Fertigung realgetreu verhalten.

Gerade die Verringerung von Rüstzeiten wird in der Forschung durch diverse Aufwendungen angestrebt. So wurden von der AWF – Arbeitsgemeinschaft „Von der Arbeitsvorbereitung zum Produktivitätsmanagement“ (vgl. [AWF16-01]) – Maßnahmen erarbeitet, die besagen, was bei Arbeitstätigkeiten zu beachten ist, um die Rüstvorgänge für die Werker zu reduzieren. Für den Punkt „Rüsten von Werkzeugen“ wurde hierbei z. B. vorgeschlagen, „nur Differenz-Werkzeuge“ einzurüsten (vgl. [AWF16-01]). Unter den Differenz-Werkzeugen werden hierbei die Werkzeuge verstanden, die durch die wechselnden Fertigungsaufträge sowie möglichen Wartungsintervalle in den nachfolgenden Fertigungsprozessen nicht benötigt bzw. ausgetauscht werden. Dieser Sachverhalt deckt sich mit der propagierten Rationalisierung von vorhandenen und neuen Betriebsmitteln, die von der AWF als Kernkompetenz der Arbeitsvorbereitung zugeschrieben wird und damit die Messung und zugehörige Interpretation, Optimierung und Rationalisierung von Taktzeiten, Rüstzeiten und allgemein Maschinenlaufzeiten meint, um den Nutzen und den Effizienzgrad einer Investition zu vergrößern (vgl. [AWF05]). Das heißt konkret, dass genau die Werkzeuge aus dem Magazin entnommen werden, die nicht mehr benötigt werden, und Werkzeuge eingewechselt werden, die für den nachfolgenden Auftrag notwendig sind. In der Regel werden die frei gewordenen Werkzeugplätze direkt neu besetzt durch neu positionierte Werkzeuge. Gerade bei Werkzeugmagazinen mit geringerer Magazinkapazität und geometrisch kleinerer Ausführung ist dieser Ansatz sinnvoll, jedoch kann dies bei oft wechselnden Werkstückarten³¹ und Geometrien insgesamt zu hohen Zwischenrüstzeiten führen. Insbesondere ist dieser Zustand problematisch, wenn beim Werkzeugbestückungsprozess durch den Werker die durch die Werkzeugentnahme freigewordenen Plätze des Magazins direkt durch die neu eingewechselten Werkzeuge belegt werden und dazu eine Fertigungsunterbrechung notwendig ist. Es kann dabei in der praktischen Anwendung vorkommen, dass zuerst alle nicht benötigten Werkzeuge entnommen werden und im Anschluss alle neu zu bestückenden Werkzeuge eingepflegt werden, was ebenfalls sehr zeitintensiv ist. Diese Wechselstrategie bzgl. der Differenz-Werkzeuge erfordert zudem eine genaue Werkzeugbedarfsplanung sowie genaue Kenntnisse über die

³¹ Verursacht durch ungünstige Auftrags- und Arbeitsplanung.

Fertigungsaufträge, die manuelle Planungsarbeiten durch rechnergestützte Werkzeuge erfordern. Diese Prüfwerkzeuge liegen nicht unbedingt als integrierte Lösung vor. Es fehlt dabei eine Vorabüberprüfung der Werkzeugpositionierung, woraus hervorgeht, welche Werkzeuge in nächster Zeit (vorübergehend) nicht mehr benötigt werden.

Im Vorab oder im Anschluss der Werkzeugpositionierung müssen die Informationen über die Positionierung der Werkzeuge auf die jeweiligen Plätze des Werkzeugmagazins in der Steuerung manuell eingepflegt werden, sodass die Maschinensteuerung erkennt, welches abgefragte Werkzeug aus dem NC-Programm welchem Werkzeugmagazinplatz zugeordnet ist. Ein häufiges Umpositionieren führt daher zu einem hohen Programmieraufwand der Steuerung.

2.2.3 Grenzen bei der rechnergestützten Anpassung der Werkzeugpositionierung

Die beschriebenen Bestückungsvarianten für die praktische Anwendung bzgl. der Verringerung der Rüstzeiten und der Umgang mit Differenz-Werkzeugen sind in der Regel zufällig und folgen keiner logischen Systematik, wie etwa der Berücksichtigung einer Werkzeugreihenfolge, bedingt durch eine Reihe abzuarbeitender NC-Programme. Wenn in einer Arbeitsschicht z. B. eine hohe Produktvariation vorzufinden ist, womit auch die Spanprozesse stark variieren, kann es dadurch zu hohen Bestückungsaufwendungen kommen, die die Gesamtrüstzeiten in die Höhe treiben. Dadurch verlängern sich unnötigerweise die Maschineneinrichtungszeiten sowie die Arbeitsvorbereitungsdauer, bis die Produktion fortgesetzt werden kann. Zudem erfolgt die Werkzeugpositionierung ohne nachhaltiges Beachten von Reststandzeiten. Lange Werkzeugwechselzyklen³² können die Folge sein, wenn sukzessiv folgende Werkzeuge aus Positionssicht nicht in unmittelbarer Nähe oder im besten Fall in direkter Nachbarschaft innerhalb des Werkzeugmagazins positioniert werden. Die sinnvolle Werkzeugpositionierung im Magazin unter Betrachtung von Randbedingungen wie der Standzeit wird in rechnergestützten Simulationswerkzeugen nicht nur auf Basis der konkreten Informationseingabe der Standzeit für jedes Werkzeug und jede Anwendung vorgenommen. Dies ist eine manuelle Eingabe und muss für jeden Auftrag und die damit verbundene Simulation kontinuierlich durchgeführt werden. Nur bei einer lückenlosen Dokumentation und sauberen Überführung der vollständigen Werkzeugdaten in die Datenhaltung ist die Berücksichtigung von Randbedingungen möglich. In der praktischen Anwendung ist dieses Vorgehen ressourcenbindend, und es gibt keine Gewährleistung, dass die erforderlichen Daten vorliegen bzw. stetig aktualisiert werden, um eine rechnergestützte Anpassung der Werkzeugpositionierung unter realen Fertigungsbedingungen durchzuführen.

Bei Werkzeugmagazinen mit einer hohen Kapazität kann es während der Fertigung zu Wechseloperationen kommen, die länger als der zwischenliegende Fertigungseingriff am

³² Der Werkzeugwechselzyklus bezieht sich hierbei vornehmlich auf die Magazinrotation, bis das neue Werkzeug durch die Werkzeugwechsellvorrichtung eingewechselt ist.

Werkstück andauern, sollten die Werkzeuge nach aktuellem Vorkommen beliebig ausgetauscht werden, womit die Magazinbestückung einer zufälligen Bestückung gleichkommt. Auch hierfür wäre eine rechnergestützte Werkzeugpositionierungsstrategie in Form einer Startbelegung wünschenswert.

Auch unter Berücksichtigung von Standzeiten der Werkzeuge und zwingend notwendigen Wartungsintervallen reichen Rüstvorgänge, die nur Differenz-Werkzeuge betreffen, nicht aus, sondern es müssen in den Rüstintervallen auch die Werkzeuge ausgetauscht werden, die vorübergehend gewartet werden sollen und nicht unbedingt für die aktuelle Fertigung genutzt werden. Mit dieser Maßnahme wird vermieden, dass der Fertigungsprozess nicht unnötig, insbesondere über längere Zeit, unterbrochen wird. Unnötige Fertigungsunterbrechungen durch ungeplante Werkzeugbestückung und Neubestückungen von Werkzeugmagazinen erschweren das Anfahren an Werkzeugwirkstellen am Werkstück, und es besteht bei Wiederanfahroperationen der Maschine die Gefahr, dass Toleranzfehler auftreten, da der Anfahrpunkt nicht exakt mit der Werkzeugspindelposition des vorab abgebrochenen Fertigungsprozesses übereinstimmt. Es können sogar ungewollte Kollisionen zwischen Werkzeugen und Werkstücken innerhalb des Anfahrweges auftreten.

Das Steuerungspanel an der Maschine als Schnittstelle zum Maschinenbediener, durch das die Werkzeugneupositionierung einprogrammiert wird, bietet dem Werker aktuell auch keine Rückkopplung hinsichtlich der Informationen über (verbleibende) Reststandzeiten. Bislang werden die Werkzeuge nach einem definierten Wartungsintervall (Einhalten der Arbeitsfähigkeit, vgl. [DiTs14]) nachgeschliffen. Das bedeutet, dass eine definierte Arbeitsfähigkeit der Schneide eines Werkzeugs angestrebt wird, die zwischen zwei Anschliffen der Werkzeuge liegt und mithilfe der Steuerung durch eine Verschleißgröße erfolgt (vgl. [DiTs14] S. 22). Diese Information muss zuvor durch die Arbeitsvorbereitung (meist aus Tabellenwerken oder durch Herstellerinformation) bereitgestellt sowie dem Werker zugänglich gemacht werden.

Zur „Optimierung“ von Werkzeugpositionierungen im Werkzeugmagazin gibt es bereits mehrere Optimierungsansätze auf Basis von Metaheuristiken und mathematischen Modellen (vgl. [AvAk96], [DeFi00]), die eine sinnvolle Lösung bzgl. der Werkzeugpositionierung bieten. Jedoch besteht hier nicht direkt die Anbindung an die Information bzgl. der Werkzeugwechselbefehle aus einem realen NC-Programm. Des Weiteren wird hierbei keine Startbelegung ausgegeben, die vom Werker in die Maschinensteuerung eingepflegt werden kann, die dabei auch die Prozesszeiten berücksichtigt, die wiederum den physikalischen Ein- und Ausbau von Werkzeugen aus dem und in das Werkzeugmagazin betreffen.

Vielmehr werden hier die reine Werkzeugwechselzeit zwischen Wechselvorrichtung und Magazin sowie die Rotation bei Ketten, Stern- oder Kreismagazinen berücksichtigt. Die Beiträge von *Avci* und *Akturk* (vgl. [AvAk96]) bieten zwar Lösungen und insgesamt einen

Beitrag für ein Planungssystem, jedoch gibt es keine konkrete Belegungsstrategie in direkter Abhängigkeit von dem vorliegenden NC-Programm oder sogar mehreren Programmen. Damit bietet der Ansatz ein verringertes Potenzial, die Zykluszeit zu verringern.

Des Weiteren gibt es eine ganze Reihe verwandter Themen, die sich zumeist auf Managementprozesse bzgl. der Werkzeugzuordnung zu verschiedenen Fertigungszentren³³ beziehen, jedoch auch hier keine Startbelegung anbieten, die sich auf eine oder mehrere Maschinen direkt (auf Basis von einem oder mehreren NC-Programmen) bezieht. Dazu können als Vergleich die Beiträge von *Stecke*, *Amoako-Gyampah*, *Gray et al.* und *Kouvelis* herangezogen werden (vgl. [Ste83], [AMR92], [GSS93] und [Kou91]). Hierbei wird deutlich, dass die Werkzeugzuordnung zu mehreren Fertigungszentren innerhalb der letzten 30 Jahre unter verschiedenen Strategien wie Zuordnung der Werkzeuge zu Losen und zu Maschinen oder zum Beispiel Mehrbenutzung von Werkzeugen durch mehrere Maschinen (*tool sharing*, vgl. [AITa01]) untersucht wurde. Die Werkzeugpositionierung im Werkzeugmagazin selbst, unter der Zielsetzung einer Zykluszeitreduzierung wurde dabei nicht fokussiert.

Dadurch dass die Zuordnung eines Werkzeugs zu einem Werkzeugmagazinplatz unter Berücksichtigung der NC-Befehl-Reihenfolge erfolgt (insb. in Abhängigkeit von den Werkzeugwechselbefehlen), wirkt die Reihenfolge der angefahrenen Werkzeugplätze im Magazin wie das bekannte *Travelling Salesman Problem (TSP)* mit abweichenden Bedingungen, wie z. B. dass der Startpunkt nicht mit dem Endpunkt übereinstimmen muss. Daher ist es bei großen Magazinkapazitäten und einem hohen Werkzeugwechselbedarf auch als schwer lösbares Problem zu verstehen. Es könnte hierbei neben den Lösungsverfahren mittels heuristischer Suchverfahren auch auf die Nutzung linearer Listen (Onlineoptimierung) zurückgegriffen werden. Die Problemstellung ist hierbei dennoch die der linearen Liste ähnlich. Der Fokus liegt jedoch vermehrt auf der Heuristik, da die Reihenfolge der nachfolgenden Werkzeuge immer bekannt ist, da sie sich auf die NC-Befehle bezieht, die zuvor, angelehnt an die Werkstück-Zielgeometrien, festgelegt werden. Das betrifft dann auch die NC-Befehle, die explizit einen Werkzeugwechsel durchführen. Zudem ist durch die Maschinenprogrammierung bekannt, auf welchem Platz die Werkzeuge programmiert sind, sodass keine Suche stattfindet, um ein bestimmtes Werkzeug aufzurufen.

2.2.4 Anforderungen an eine Methode zur Werkzeugpositionierung

Zur Lösung der hier dargelegten Problemstellung sind Anforderungen beschrieben, die durch den Ansatz zur Werkzeugpositionierung erfüllt werden:

Das Verfahren muss die Werkzeugwechselbefehle aus dem NC-Programm lückenlos identifizieren, die Werkzeuginformationen extrahieren und eine Platzzuordnung der Werkzeuge zu Werkzeugmagazinplätzen aufweisen. Dabei können ein oder mehrere NC-

³³ Betreffend die Themenbereiche von TMS (Tool Management System).

Programme hintereinander geschaltet sein. Die Werkzeugbefehle sowie die Reihenfolge sind dabei durch das NC-Programm vorgegeben. Um realitätsnahe Lösungen zu erarbeiten, sind die Entwicklungen an eine reale Werkzeugmaschine angelehnt, wodurch das Modell nicht generisch ist, jedoch realitätsnahe Prozesse bzgl. der Arbeiten mit dem Werkzeugmagazin, der Bestückung und der Werkzeugpositionierung ermöglicht werden. Die Prozesse und Informationsgrundlagen sollen hinsichtlich äquivalenten Maschinen und Werkzeugmagazinen anpassbar sein.

Die erforderliche zu ermittelnde Platzzuweisung für die Positionierung muss die Werkzeugmagazinkapazität berücksichtigen, sollte das NC-Programm mehr Werkzeuge für die Werkzeugoperationen beinhalten, als Magazinplätze vorhanden sind.

Das erarbeitete Modell soll dabei die zeitlichen Wechselprozesse zwischen zwei Werkzeugen (Werkzeug-zu-Werkzeug) darstellen und mittels Distanzmaß bewerten, wie die Güte der Position der „Wechselwerkzeuge“ ist. Die Prozessdarstellung und verbundene Zeiten sollen nachvollziehbar ermittelt werden. Technische Datenblätter unterstützen hierbei.

Die aufgenommenen Prozesszeiten müssen auf einem offiziellen Zeitmessvorgehen basieren, wie z. B. der Ermittlung der Span-zu-Span-Zeit nach den zugrunde liegenden VDI-Richtlinien.

Als Ausgabe soll eine Startbelegung der Werkzeugpositionierung für den Nutzer ermittelt werden. Dabei sollen auch übergroße Werkzeuge, die mehr als einen Platz benötigen, berücksichtigt werden.

Zudem werden Wegwerfstrategien notwendig sein, die ermitteln, welche Werkzeuge ausgewechselt und in den Werkzeugspeicher außerhalb der Maschinenumgebung abgelegt werden, wenn die Magazinkapazität nicht die Variantenvielfalt der notwendigen Werkzeuge abdeckt. Diese Wegwerfstrategien sind theoretisch denkbar und sollen hier nur dargestellt werden. In der praktischen Anwendung wird eine Umordnung der Werkzeuge im Magazin, sollten die notwendigen Werkzeuge für ein NC-Programm die Werkzeugmagazinkapazität überschreiten, auf diese Weise erfolgen, sodass das Magazin ganz oder nur so weit geleert wird, bis die übrigen nachfolgenden Werkzeuge in das Magazin passen. Die Komplettleerung und Wiederbefüllung des Magazins sind aus Gründen der Zykluszeitreduzierung auch hier eine zwingende Maßnahme. Ein weiterer Grund ist, dass damit eine weitere Startbelegung genutzt werden kann, die zuvor durch das Verfahren zur Werkzeugpositionierung ermittelt wurde. Eine Durchführung des Verfahrens zur Werkzeugpositionierung ist auch mit den verbleibenden Werkzeugen möglich, wenn die Magazinkapazität nicht ausreicht. Dieses Vorgehen ist sinnvoll, da dadurch nur eine einzige (oder wenige) Fertigungsunterbrechung zustande kommt, als bei einzelner und mehrfacher Umordnung in Abhängigkeit des direkten Bedarfs und Aufruf des gefragten Werkzeugs durch das NC-Programm.³⁴

³⁴ Im schlimmsten Fall sind die Fertigungsunterbrechungen gleich der Anzahl der nachfolgenden Werkzeuge bis zum NC-Programmende, sollte im Magazin kein Werkzeug eingelegt sein, was für die aktuellen

Des Weiteren muss das Positionierungsverfahren Daten generieren, die direkt in die (Benutzer-)Schnittstelle eingearbeitet werden können, sodass das Aufspannverfahren sowie eine Werkzeugpositionierung auf dieselbe Datenbasis zugreifen und deckungsgleich mit den Angaben im NC-Programm sind. Zur Steuerung kann hierzu als Schnittstelle eine onlinebasierte Lösung (GUI) verfolgt werden (vgl. Kapitel 2.3).

Darstellung der Interaktion der Schnittparameter als Werkzeugauswahlunterstützung zur Berücksichtigung von Reststandzeiten:

Die Werkzeugauswahl für ein Fertigungsvorhaben basiert auf empfohlenen Schnittparameterkonfigurationen, die von Werkzeugherstellern ermittelt werden und in umfangreichen Tabellenwerken erfasst sind. Dabei handelt es sich bspw. um die Schnittbreiten, Schnitttiefen in Kombination mit Schneidstoffen, Drehzahl, Schnittgeschwindigkeiten in Abhängigkeit geometrischer Werkzeuggrößen, die in kombinierter Form Tendenzen zulassen, bestimmte Standzeitangaben als Planungsgrößen einzuhalten. Dabei ist die exakte Bestimmung einer Standzeit sehr komplex und in der Durchführung aufwendig, da dazu eine hohe Anzahl empirischer Experimente unter Realbedingungen notwendig sind. Auch auf Basis experimenteller Ergebnisse ist zudem nicht vollständig sichergestellt, ob die angegebene Standzeit auch wirklich eingehalten wird, sodass insgesamt nur Richtwerte herausgegeben werden. Dabei ist es in der realen Fertigung nicht immer üblich, die Standzeit nach jeder Werkzeugnutzung zu erfassen und zu dokumentieren, da dies aus organisatorischer Sicht sehr arbeitsaufwendig ist und z. T. kostenintensive Mehrarbeit bedeuten würde. Dabei kann die Standzeit durchaus ein hinweisgebendes Werkzeug sein, eine Werkzeugpositionierung so vorzunehmen, dass die Werkzeuge ausgewählt sind, die die Standzeiten durch die Bearbeitungszeiten einhalten. Auch ein Erfassen der Reststandzeit auf Basis der Werkzeugeingriffszeit könnte ein Beitrag zur Lösung sein. Hierzu ist es ebenfalls wichtig, dass auch die relevanten zeitlichen Komponenten aus dem NC-Programm extrahierbar sind. Eine Lösung in Form eines „*preprocessing*“ wäre denkbar. Auch sind dadurch Wartungsfälle deterministisch planbar, und Wiederbeschaffungsvolumen der Betriebsmittel wären absehbar. Dabei können diese werkzeugwahlunterstützenden Maßnahmen durch IT-Werkzeuge verwirklicht werden, sollten die notwendigen Daten vollständig akquirierbar sein.

Die notwendigen Werkzeug-Daten sind hierzu in einer Datenhaltung zu speichern, und die Standzeitabschätzung erfolgt durch ein Modell, basierend auf theoretischen Grundlagen aus dem heutigen Stand der Technik.

und nachfolgenden Fertigungsoperationen benötigt wird, und ein Werkzeugaus- und -einbau nach jedem Fertigungsschritt erfolgt. Zudem ist hierbei ggf. die Magazinkapazität mit unbrauchbaren Werkzeugen aus „veralteten“ Fertigungsprogrammen ausgeschöpft.

2.3 Benutzerschnittstelle

2.3.1 Grenzen bei der durchgängigen Lösung einer Schnittstelle

Eine durchgängige Schnittstellenlösung, die dem Nutzer standardisierte Datenformate zur Verfügung stellt, um produktspezifische Informationen für die Überprüfung von Werkstück- und Werkzeugpositionierung zu bearbeiten sowie auftragsrelevante Daten einzubringen, ist notwendig.

Definition 12: Benutzerschnittstelle

Eine Benutzerschnittstelle dient der Interaktion eines Nutzers mit einem System. Allgemein wird diese durch einen sog. Kommandointerpreter realisiert, der bestimmte Bedienerhandlungen auswertet. Benutzeroberfläche ist ebenfalls als Benutzerschnittstelle anzusehen. Dazu zählen allgemein Text-Menüs, Bildschirmmasken (s. auch Definition Benutzeroberfläche) sowie eine GUI. (vgl. [ScWe07])

Definition 13: Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche ist der Teil eines Systems, mit dem der Nutzer mit dem System arbeitet, und setzt sich hierbei aus Hardwareelementen, Eingabeelementen sowie Befehlen zusammen, die notwendig sind, um mit dem System zu arbeiten (vgl. [LLS10] S. 971). Dazu zählen auch Webmasken, Befehlskonsolen und Anzeigegeräte (vgl. [LLS10] S. 937).

Benutzerschnittstellen, die sich als webbasierte Dienste darstellen, beruhen vermehrt auf VR-Technologien (VRML). Sie bieten die Darstellung von Materialabtrag, kinematischem Verhalten einer Maschine, Datentransformation von CAD zu VR sowie die Darstellung komplexer Produktgeometrien (vgl. [AXH11], [HaYu09]). VR-Technologien sind einzelner Simulationsinstanzen zugehörig, die nicht zwangsläufig mit der Überprüfung der Maschineneinrichtung verknüpft sind. Es ist zudem nicht gewährleistet, dass kommerziell verfügbare reale Maschinen dargestellt werden, die die Fertigung einer Organisation realitätsnah überprüft. Auch werden explizit keine Bezüge zu realen Fertigungsaufträgen hergestellt. Das bedeutet, dass keine Erstellung und Verteilung von verschiedenen Aufträgen stattfindet, in dessen Zuge, ohne manuelle Bedienung (Konfiguration), verschiedene Werkstückpositionen überprüft werden.

Für die Verknüpfung bereits bekannter und praktisch erprobter Methoden und Verfahren zur Verwaltung von auftragsrelevanten Daten, den Maschineneinrichtungsparametern inklusive einer Werkzeugverwaltung, Spannmitteln, Arbeitsplätzen und der Beachtung fertigungsrelevanter Randbedingungen sind zur IT-technischen Umsetzung neue bzw. erweiterte Schnittstellen erforderlich. Diese Schnittstellen beachten dabei auch Methoden des Wissensmanagements. Die Schnittstellen sollen im Idealfall standardisiert und nahe am Stand der Technik erprobt sein, was jedoch nicht immer gegeben ist. Insbesondere wenn

es um interorganisatorische Zusammenarbeit geht, sind viele Defizite in der Praxis zu verzeichnen. Schnittstellenprobleme existieren häufig sogar intraorganisatorisch zwischen Abteilungen, die sich lokal oder weltweit an diversen Standorten befinden können.

In der praktischen Anwendung von Simulationssoftware als Testumgebung gibt es daher eine hohe Diversifikation bzgl. der Verfügbarkeit. Das bedeutet, dass Rechnerressourcen offline nur an bestimmten Orten für aufwendige Simulationen zur Verfügung stehen (z. B. für FEM-Berechnung). Auch ist es nicht zielführend, dass die Simulationssoftware auf jedem Rechner innerhalb und auch außerhalb einer Organisation vorinstalliert ist, was, bedingt durch die gesonderte Pflege und Lizenzbereitstellung, auch einen Kostenfaktor darstellt.³⁵ Die Lizenzbereitstellung als solche verläuft technisch problemlos. Im Rahmen der Maschineneinrichtung und Überprüfung von NC-Programmen sind Verfügbarkeit, Zugriff auf die Softwarewerkzeuge sowie zeitliche Ressourcen unabdingbar, um in adäquater Zeit Rückschlüsse auf die Qualität des zu überprüfenden NC-Programms festzustellen und jeweilige Änderungen bzgl. der einhergehenden Einrichtungsituation durchzuführen und auch zu kommunizieren. Gerade bei intra- und auch interorganisatorischer Arbeit, auch weit über die Grenzen der eigenen Organisation hinaus, ist ein Zugriff auf die Testumgebung zur Einrichtungsituation von Maschinen und Anlagen essenziell. Eine sinnvolle Bereitstellung von Schnittstellen stellt hierfür eine Pflichtanforderung dar.

In diesem Kontext wird bei Schnittstellen zwischen Softwareschnittstellen³⁶ und Benutzerschnittstellen unterschieden. Die Benutzerschnittstellen werden hierzu fokussiert betrachtet, da sie die Schnittstellen zwischen dem Planer/Werker und den Ansätzen für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung darstellen. Im konkreten Anwendungsfall handelt es sich bei der Benutzerschnittstelle um eine grafische Benutzeroberfläche (GUI), die onlinebasiert ortsunabhängig angesteuert werden kann. Zur Bedienung dient der konventionelle Umgang mit Eingabegeräten wie z. B. einer Tastatur oder eine Eingabe über „*Touch-Bildschirme*“.

Die onlinebasierte GUI erfolgt rechnergestützt und kann somit vielen Gestaltungsfreiheiten unterliegen, was sich auf die Nutzerfreundlichkeit auswirkt. Dabei können beliebig viele Funktionen und Ausgabemöglichkeiten geschaffen werden, sodass ein solches System im ungünstigen Fall unübersichtlich sein kann. Insbesondere Bedienern ohne bzw. mit geringen IT-Kenntnissen wird dadurch die Arbeitsvorbereitung unter Anwendung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung erschwert. Für die notwendigen Softwareprogramme sind in regelmäßigen oder unregelmäßigen Abständen Wartungsarbeiten und „*Updates*“ erforderlich, was bei Softwareschnittstellen zu Kompatibilitätsschwierigkeiten

³⁵ Äquivalentes gilt auch für eine Client-Server-Lösung allgemein, auch bei der Nutzung eines „Rich-Clients“ oder einer *Cloud-Lösung*.

³⁶ Eine Softwareschnittstelle (synonym für Programmierschnittstelle) ist auch als englischer Terminus „*Application Programming Interface*“ (API) bekannt und definiert durch Semantik und Syntax die Funktion eines Systems in Form von sog. Systemdiensten (vgl. [ScWe07]).

ten oder Funktionseinschränkungen der Schnittstelle führen können. Die Wartungsfreundlichkeit der Schnittstellenlösung ist deshalb ein wichtiger Faktor, um das System langfristig aufrecht zu erhalten.

2.3.2 Anforderungen an die Benutzerschnittstelle

Zur Vermeidung zeit- und rechenintensiver Simulationsverfahren als Testumgebung von Aufspannsituationen stellen eine ausreichende Rechnerverfügbarkeit und nutzerfreundliche Schnittstellen wichtige Infrastrukturelemente dar. Dabei muss gewährleistet sein, dass ein Rechnerzugriff online verfügbar ist, sodass der Nutzer über Login-Verifizierung standortunabhängig Zugang zu auftragsrelevanten Daten über die GUI erhält. Die GUI ist darüber hinaus über einen konventionellen Internetbrowser aufrufbar. Ein individueller Zugang zu den nutzerspezifischen Datenbanken ist erforderlich.

Zur Sicherstellung einer eindeutigen Zuordnung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung zu dem basierenden NC-Programm ist eine Verknüpfung mit einem konkreten Fertigungsauftrag zielführend. Dadurch können des Weiteren die gültigen und ungültigen Werkstückpositionen sowie die „besten“ gefundenen Werkzeugpositionen, bezogen auf ein NC-Programm, gespeichert werden. Eine eindeutige Zuordnung über die gesamte Planung bis zur Fertigung hinaus ist damit gewährleistet. Die Erstellung eines Auftrags ist dabei auch die Voraussetzung für das automatische Ansteuern der Identifizierung von Werkstück- sowie Werkzeugpositionen. Die GUI ist nach einem Workflow für eine Auftragserstellung orientiert, sodass der Nutzer insgesamt eine Übersicht erhält.

Definition 14: Workflow

Der Workflow beschreibt einen arbeitsteiligen und wiederkehrenden Geschäftsprozess, bei dem Aufgaben, Verarbeitungseinheiten und das Beziehungsgeflecht innerhalb eines zugrunde liegenden Prozesses festgelegt werden. Wichtige Voraussetzung ist eine vorausgehende Bekanntheit von Arbeitsablauf und Datenfluss [Gab16-ol].

Über die GUI können auch geometrische Daten definiert werden, sollten aus vorangegangenen Aufträgen früherer Perioden keine vorliegen, um eine Werkstück- und Werkzeugpositionierung durchführen zu können. Daneben sollen Datensätze zur Anbindung an das Simulationsmodell, hier z. B. durch das VMDE³⁷-Datenformat, automatisch verarbeitet werden können. Dabei ist ein Extrahieren des NC-Programms aus dem Datenformat (VMDE) erforderlich. Es erfolgt auch ein Verknüpfen des Datenformats mit einem zugehörigen Auftrag als gesamter Simulationsauftrag für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung. Die dazu notwendigen Bedienungsschritte sollten in iterativen Schritten durch eine „Reitersicht“ unter Anwendung der einzelnen Masken der GUI erfolgen.

³⁷ VMDE ist ein XML-basiertes strukturiertes Datenformat.

3 Stand der Technik

3.1 Werkstückpositionierung

3.1.1 Werkzeug für die Werkstückpositionierung

Motiviert ist die Entwicklung eines Werkzeugs zur Werkstückpositionierung dadurch, dass die eigentliche Werkstückpositionierung auf einer CNC-Maschine in Abhängigkeit von Beschaffenheit und Bearbeitungskomplexität des Werkstücks eine längere Zeitdauer in Anspruch nehmen kann als die eigentliche Fertigung. Der Beitrag von [CGL99] stellt hierzu drei Algorithmen vor, deren Leistungsfähigkeit u. a. anhand von Genauigkeit, Konvergenz und Berechnungseffizienz verglichen wird. Bei den Algorithmen handelt es sich um den *Variational-Algorithmus*, den *Tangent-Algorithmus* und den *Hong-Tan-Algorithmus* (vgl. [CGL99]). Der *Hong-Tan-Algorithmus* zeigt die höchste Genauigkeit und Berechnungseffizienz. Die Analyse wurde hierbei mithilfe von Simulationswerkzeugen durchgeführt. In dem Beitrag von [CGL99] wird u. a. vorgesehen, dass das Werkstück durch einen Sensor vorab vermessen wird, um die Messpunkte für die Position und Orientierung des Werkstücks mit dem vorliegenden CAD-Modell zu vergleichen. Werkzeugpfade werden durch die euklidische Transformation an die entsprechende Position und Orientierung angepasst, wodurch ein aufwendiger Werkstückpositionierungsprozess verkürzt wird. Der Beitrag trägt insgesamt anhand des Algorithmusvergleichs zur Forschung bei, jedoch wird eine vertiefte oder sogar real umgesetzte Werkzeugpositionierung nicht weiter verfolgt, und es wird kein Bezug zu einer Anpassung des NC-Programms hergestellt. (vgl. [CGL99])

Zur Analyse von Werkstückpositionen auf Basis von Ortsfehlern/Lokalisierungsfehlern werden durch eine homogene Koordinatentransformation Restriktionsgleichungen des Werkstücks definiert. Diese Restriktionsgleichungen werden anschließend anhand der *Newton-Raphson-Methode* und einer *Monte-Carlo-Simulation* numerisch gelöst. Zusätzlich wird anstelle der *Monte-Carlo-Simulation* eine quadratische Approximation zur Lösung des numerischen Problems herangezogen. Anhand von Fallstudien werden diese Ansätze validiert (vgl. [CLC+08]). Angestrebt wird hierbei eine möglichst exakte Positionslösung (vgl. [CLC+08]), wobei allein die Position im Fokus steht, ohne auf weitere Randbedingungen der realen Fertigung einzugehen.

Ein Algorithmus (*Boundary Search Method*) für die Bestimmung des Arbeitsraums einer Werkzeugmaschine mit einer parallelen Kinematik wird in [WWL+01] vorgestellt. Daneben ist eine Umsetzung einer automatischen Werkstückpositionierung durch ein mathematisches Modell gezeigt. Hierbei werden die Fertigung sowie die Verwaltung und Verwendung von NC-Programmen eingeschränkt mit eingeschlossen, wenn auch die Validierung mit einer realen Vorrichtung sowie einem Roboter erfolgt. Die Anwendung ist technisch sinnvoll, bezieht sich jedoch nur auf eigentliche Positionskoordinaten. Eine

Rückmeldung, ob die ermittelte Position zu verringerten Fertigungszeiten führt, oder ob umständlichen Werkstückpositionen verursacht werden, ist in dem Ansatz nicht gegeben.

Bei der Werkzeugpositionierung von [NYN+13] werden neben den kartesischen Koordinaten auch Kugelkoordinaten verwendet. Die Positionierung wird hierbei durch den Nutzer mithilfe der Anwendung *Autodesk Inventor* in einer Simulationsumgebung vorgenommen. (vgl. [NYN+13])

In dem Beitrag [PLS+13] wird argumentiert, dass die Werkstückpositionierung (insb. bei komplexen Geometrien) auf 5-Achs-Bearbeitungszentren willkürlich vom Bediener des CAM-Werkzeugs festgelegt werden. Hierbei wird ferner betont, dass Ausrichtung und Positionierung durchaus Auswirkungen auf die Bearbeitungszeit haben können. Ziel des Beitrags ist es, dass in Abhängigkeit vom kinematischen Verhalten der Werkzeugmaschine das Werkstück so ausgerichtet wird, dass die zurückgelegte Wegstrecke des Werkzeugs minimiert wird. Als zweiter Ansatz wird dabei noch die Positionierung in translatorischer Achsenrichtung vorgenommen. Der Lösungsraum wurde mithilfe eines Gitters diskretisiert. Durch die Gitter-Diskretisierung schwankt die Berechnungszeit in Abhängigkeit von der Granularität des Gitters, wodurch Berechnungszeiten von wenigen Sekunden bis zu mehreren Stunden auftreten. Die Validierung dieses Verfahrens erfolgt auf realen Werkzeugmaschinen, losgelöst von Simulationswerkzeugen wie z. B. einer vWZM. Die Positionierung und Bewertung für die Aufspannung auf dem Maschinentisch erfolgt über ein Pseudo-Distanzkriterium. Eine Kombination von Ausrichtung und Positionierung anhand translatorischer Koordinatenrichtung wird nicht direkt fokussiert, jedoch ergibt die Kombination der Verfahren harte Restriktionen – vergleichbar mit einer Boundary-Box, – in der die Aufspannung des Werkstücks erfolgen kann. Generell werden auch Orientierungen dargelegt, die ungültig sind. Zudem wurde eine Abweichung zwischen der programmierten Vorschubgeschwindigkeit und der real erreichten Vorschubgeschwindigkeit während des Abfahrens des Werkzeugpfads festgestellt. Durch Anpassen der Vorschubgeschwindigkeit kann Einfluss auf die Qualität des Werkstücks und die Lebensdauer und Standzeit des Werkstücks genommen werden, was in dem Beitrag jedoch nicht konkretisiert wird (vgl. [PLS+13]). Die Verlässlichkeit des Systems hängt von der einmaligen Validierung durch die Maschinen ab, und bei serienreifer Anwendung des Ansatzes werden eine Verlässlichkeit und korrekte Anwendung vorausgesetzt, da keine Zwischenüberprüfung durch eine Simulation³⁸ erfolgt. Auch wird keine NC-Programmanpassung vorgenommen.

Als Werkstückpositionierung wurde ferner ein lasergestütztes Positionierungssystem (optische Messung) entwickelt, welches mittels Triangulierung eine mittlere Ungenauigkeit von 13 μm aufweist (vgl. [WNM+99a]). Diese Abweichung liegt innerhalb der Ungenauigkeit, die durch die Werkzeugbewegung ohnehin anzunehmen ist. Nachteilig bei dem

³⁸ Durch die Simulation könnten auch Fehler vermieden werden, die durch ein Pseudo-Distanzkriterium bspw. zur Vermessung des Maschinentisches entstehen, sollten hierbei falsche Annahmen getroffen werden.

System ist, dass eine hohe Empfindlichkeit auf optische Störfaktoren besteht sowie langwierige Scanvorgänge feststellbar sind (vgl. [WNM+99a]). Die genannten Schwächen sind in [WNM+99b] adressiert: Es wird hierzu eine Lösung vorgeschlagen, die analog zu dem bestehenden GPS (*Global Positioning System*) ist (vgl. [WNM+99b]). Sender-Empfänger-Paare sollen in einem universellen System eine Positionierung eines Werkstücks innerhalb des Arbeitsraums ermöglichen. Für die Potenzialanalyse dieser Lösung wurde dazu ein ultraschallbasiertes Werkstückpositionierungssystem untersucht, bei dem Werkstück und Werkzeugmaschinenanteile mit entsprechenden Ultraschallsendern und –empfängern ausgestattet sind. Der mittlere Positionierungsfehler beträgt bei dieser Methode 0,185 mm, wodurch eine geringere Genauigkeit bescheinigt wird im Vergleich zu der lasergestützten Methode. (vgl. [WNM+99b])

Ein weiterer Ansatz für ein optisches Positionierungssystem wird in [FSE15] vorgestellt. In diesem Beitrag wird ein kamerabasiertes Positionierungssystem für die Feinbearbeitung vorgestellt. Kern des Systems ist ein „Künstliches Auge“-Algorithmus (*Artificial Vision Algorithm*). Das Kamerabild wird vom System zunächst vergrößert und in einzelne Pixel zerlegt. Anschließend wird die Leuchtintensität der einzelnen Pixel bewertet. Anhand der unterschiedlichen Leuchtintensitäten kann das System einen Werkzeugpfad bzw. Zielkoordinaten festlegen (vgl. [FSE15]). Der Ansatz ist eine effektive Methode bei der Positionierung in geringen Dimensionen. Mit handelsüblichen Werkzeugmaschinen wurden keine Tests gezeigt.

Angelehnt an die optischen Positionierungsmethoden sowie die Nutzung von Peripherie- und Messgeräten zur Erfassung von Werkstückpositionen, ist zur Ausrichtungskorrektur eines Werkstücks eine laserbasierte Triangulierungstechnik entwickelt worden. Mittels dieser Technik wird das Profil der Werkstückoberfläche dreidimensional erfasst und mit dem Profil eines Referenzwerkstücks verglichen. Anhand der Abweichungen kann der Werkzeugpfad an die ermittelte tatsächliche Werkstückausrichtung angepasst werden. Für die Bestimmung der Abweichung wird ein iterativer *Closest Point-Algorithmus* angewendet. Positionierungsfehler des Werkstücks werden auf diese Weise ausgeglichen. In anschließenden Experimenten wurde eine durchschnittliche Abweichung von 0,23 mm zwischen gemessenem und tatsächlichem Wert ermittelt. Insbesondere für Anwendungen, bei denen eine gleichmäßige Werkstückaufspannung nicht gewährleistet werden kann, ist dieses System relevant (vgl. [KPJ+16]). Mit einer weiteren Scanmethode mittels 3D-Scan, durch die ein schneller Abgleich des Werkstück-Referenzpunktes erfolgen kann, wird das Koordinatensystem entsprechend der Positionierung im Arbeitsraum für die weitere Bearbeitung auf der CNC-Maschine exakt angepasst (vgl. [PaGr15]). Dadurch wird auch die Verbindung zur Gestaltung des NC-Programms hergestellt. Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Beitrags [PaGr15] befand sich das System in der Erprobungsphase. Die ersten Ergebnisse zeigen dabei eine deutliche Verbesserung der Durchlaufzeit (vgl. [PaGr15]).

Zur Reduzierung des Messaufwands zur Werkstückvermessung zur verbesserten Positionierung wird die Verwendung einer CNC-gesteuerten Werkstückpositionierung mittels

Planarmotoren vorgeschlagen. Hierbei werden bis zu sechs luftgelagerte, säulenförmige Läufer-Module durch eine Software gesteuert und so auf einer statischen Grundplatte in die erforderliche Position für eine optimale Werkstückaufnahme gebracht. Die Luftlagerung der Läufer reduziert den *Slip-Stick-Effekt* und gewährleistet dadurch eine erhöhte Präzision der Positionierung sowie eine Reduzierung des Verschleißes (vgl. [ScZe03]). Die Methode beinhaltet die Verwendung einer Vorrichtung und identifiziert keine Koordinaten auf Basis bestehender Maschineneinrichtung und Fertigungssituation, die als „Wissen“ gespeichert werden können. Eine vergleichbare Methode und technische Vorrichtung werden durch [INA17-ol] angeboten.

Aus Sicht der Werkstückbefestigung gibt es zudem Ansätze und Strategien, diese flexibler zu gestalten und zu beschreiben. Bei einer computergestützten Fertigung ist daher eine rekonfigurierbare Befestigungssystematik notwendig, bei der Befestigungsmodule teil- oder vollautomatisiert an das individuelle Werkstück angepasst werden (vgl. [Shi02]). Dazu sind Voraussetzungen im Hinblick auf die Werkstückpositionierung zu erfüllen (vgl. [Shi02]). Eine Übersicht über die flexible Werkstückhalterungsvorrichtung und die Voraussetzungen ist in Abbildung 1 dargestellt (vgl. [Shi02]).

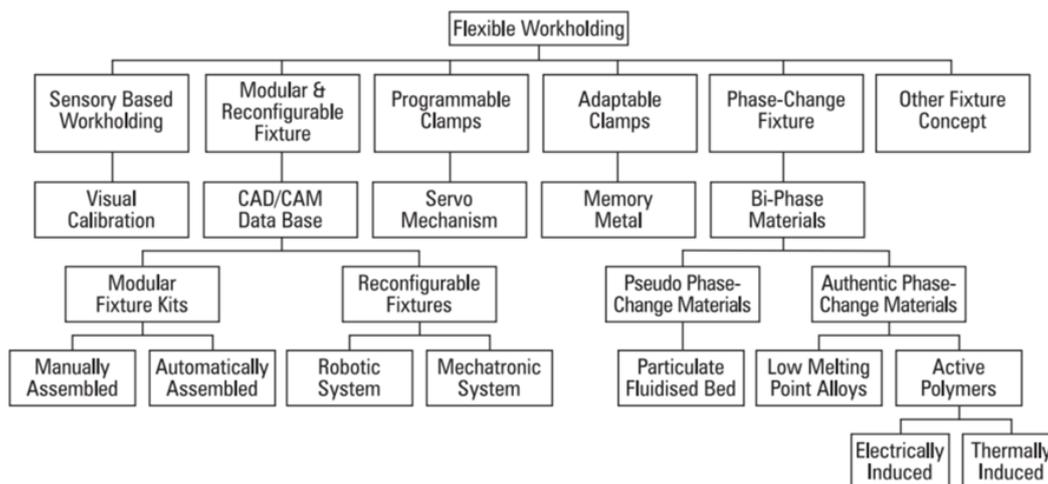


Abbildung 1: Übersicht über die flexible Werkstückbefestigung (vgl. [Shi02])

Ein Ansatz, bei dem Bezugspunkte bzw. Bezugsfehler eliminiert werden und auch das NC-Programm dahingehend korrigiert wird, ist in dem Beitrag [FaAr13] dargestellt. Dieser Beitrag kommt der Idee nahe, Werkzeugpositionierungen zu verbessern und dabei das NC-Programm inklusive Nullpunkten anzupassen. Hier wird argumentiert, dass Bezugspunktfehler (z. B. negative Nullpunktverschiebung) häufig eine fehlerhafte Werkstückpositionierung verursachen und sich damit nachteilig auf die Bearbeitungszeit auswirken. Durch die vorgestellte Methode lassen sich Bezugspunktfehler auf 5-Achs-Bearbeitungszentren systematisch eliminieren, indem der Effekt des Bezugspunktfehlers zunächst mathematisch modelliert wird (vgl. [FaAr13]). Ein Kompensationsmodul, welches das NC-Programm modifiziert, gleicht auf diese Weise einen Bezugspunktfehler aus. Anhand von

zwei Fallstudien kann nachgewiesen werden, dass die vorgestellte Methode Bezugspunktfehler auf einer 5-Achs-Drehmaschine effektiv reduzieren kann (vgl. [FaAr13]). Auf einer Fräsmaschine wurden keine Tests vorgenommen, sodass hierzu keine Aussage möglich ist. Auch bezieht sich die Methode nur auf die Nullpunkte bzw. Bezugspunkte und hat keinen weiterführenden positiven Einfluss auf andere Befehle des NC-Programms. Die nachfolgende bzw. weitere NC-Fertigung wird nur am Rande betrachtet.

Eine Berechnungsmethode, basierend auf geometrischen Daten und unter Berücksichtigung von Werkstückorientierung, Werkstückzielgeometriemodellen, Prozessplanungsdaten (TRV, *Total Removal Volume*) sowie Werkzeugeigenschaften (Länge, Platzbedarf), ist in [ISS14] gezeigt und bildet eine sinnvolle Methode, eine Werkzeugpositionierung auf Basis von Berechnungen vorzunehmen, bei denen auch kritische Werkzeugeingriffe berücksichtigt werden.

3.1.2 Testumgebung für NC-Programme

Moderne NC-Simulationssysteme bilden reale Fertigungsanlagen in einer 3D-Umgebung realitätsgetreu nach. Dies ermöglicht die Betrachtung der Bearbeitungsprozesse aus nahezu jedem Blickwinkel. NC-Programmiersysteme bieten häufig eine Simulationskomponente an, welche auf Grundlage der NC-Quelle (vor Bearbeitung durch den Postprozessor) die Bewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug bzw. die Verfahrensanweisung eines NC-Programms, die für die NC-Maschine umgesetzt wird, darstellt. Auf diese Weise wird eine erste Kontrolle des Programmierergebnisses erreicht. Die Simulationwerkzeuge zur Überprüfung von NC-Programmen stellen hierzu einen Ansatz zur Reduzierung der Arbeitsteiligkeit in der Arbeitsvorbereitung dar und lassen die Integration unterschiedlicher Aufgabenbereiche zu (vgl. [Sch92]). Für Analysen der exakten Geometrie und Laufzeit sind Simulationssysteme auf Basis des endgültigen NC-Codes heranzuziehen, da erst nach dem Postprozessorlauf Arbeitsraum und Maschinenparametersatz festgelegt werden und Fehler im Postprozessor vom Simulationssystem nicht erkannt werden bzw. erst beim Einfahren auf einer Maschine sichtbar werden (vgl. [KiRo11] S. 432). Aussagekräftige Simulationsuntersuchungen sind nur auf Basis des realen NC-Programms möglich. Hierbei wird exakt der Programmtext simuliert, der auch auf der realen Maschine verarbeitet wird, und zwar inklusive aller Unterprogramme, Zyklen und Parametertabellen, wie beispielsweise Nullpunktverschiebungen oder Werkzeugkorrekturen (vgl. [KiRo11] S. 432–433). Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus einem NC-Programm nach [FrKe84] inklusive Kurznomenklatur der Befehlsbedeutung.

Tabelle 1: NC-Programmausschnitt nach Franz und Kern (vgl. [FrKe84])

Satznummer	G-/M-Funktionen	Koordinaten/Parameter				Befehlsbedeutung
N100	G17					N1 bis N4999 Satznummern Hauptprogramm, G17: Ebene XY ausgewählt
N110	T1	S980	M03			T1: Werkzeug T1, S...: Drehzahl [U/min], M03: Arbeitsspindel rechtsherum
N120	G00	X-15	Y-15	Z-5		G00: Positionieren im Eilgang
N130	G43					G43: Fräserradiuskorrektur „bis“
N140	G01	X8	F300			G01: Geradeninterpolation im Vorschub, F...: Vorschub [m/s]
N150	G41					G41: Fräserradiuskorrektur „links“/Werkzeugbahnkorrektur links
N160	G01	Y85				G01: Geradeninterpolation im Vorschub
...
N190	G02	X75	Y58	I0	J-17	G02: Kreisinterpolation rechtsdrehend (im Uhrzeigersinn, mathematisch negative Zählrichtung), J-17: Achse Kreisbogen, I0: Achse Kreisbogen
N200	G03	X75	Y34	I0	J-12	G03: Kreisinterpolation linksdrehend (gegen Uhrzeigersinn, mathematisch positive Zählrichtung), J...: Achse Kreisbogen, I...: Achse Kreisbogen
...
N330	G22	A5000	H1			G22: Unterprogramm wird aufgerufen – A: beginnend mit der Satznummer 5000
...
N380	M05					M05: Arbeitsspindel anhalten
N390	G00	X-30	Y-30	Z50		G00: Positionieren im Eilgang (Ausgangslage)
N400	M02					M02: Programmende

Neben der Verifikation von NC-Programmen wird die NC-Simulation bei der Serienfertigung insbesondere auch zur Taktzeitoptimierung eingesetzt. Exakte geometrische und zeitliche Abfolgen des Bearbeitungsvorgangs im Simulationssystem ermöglichen es dem Nutzer, Bewegungen und Fertigungsabläufe innerhalb der Maschine sowie die Maschinenperipherie zu konfigurieren und zu optimieren. Die dabei angewendeten Optimierungsziele sind z. B.:

- Minimierung der Sicherheitsabstände
- Parallelisierung von Bewegungsabläufen, wie z. B. parallele Werkzeugeingriffspositionierung zur Maschinentischbewegung

- Vermeidung von Werkzeugwechseln durch Tausch von Bearbeitungsreihenfolgen
- Auslastung verketteter Anlagen konfigurieren

Ohne NC-Simulation wären der Maschineneinstellungsprozess und das Verifizieren von NC-Programmen hinsichtlich der Fehlerhäufigkeit und der damit verbundenen Kosten (Reparaturen, Wiederbeschaffung verschlissener Werkzeuge, Materialkosten) sehr riskant. Des Weiteren würden die Einrichtung und der gesamte Arbeitsvorbereitungsprozess zeitaufwendiger werden. Besonders in der Serienfertigung kann durch die genannten Optimierungsziele eine deutliche Taktzeitsenkung erreicht werden, was zu einer erheblichen Kostenreduktion führt, die den Optimierungsaufwand rechtfertigt (vgl. [KiRo11] S. 443).

3.1.2.1 Grundlagen NC-Steuerung

„Jede Numerische Steuerung basiert auf drei Komponenten (Rechnersteuerung, drehzahlgesteuerter Antrieb, Positionerfassungssystem)“, unabhängig von Art der Maschine oder Anlage (vgl. [Dan09] S. 1354, [SLS+99]). Mit diesen drei Komponenten lassen sich die Verhaltensweisen der Anlage beschreiben (Bewegungsbahnen, Vorschub, Geschwindigkeit, usw.) (vgl. [Dan09] S. 1354, [RNS94]). Das NC-Programm steuert die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, ausgehend von Geometrie-, Technologie-, Werkzeug-/ Betriebsmittel- und Material-/ Werkstoffdaten (vgl. [Dan09] S. 1354, [Eve97]).

Das bedeutet, dass die NC-Programmierung maschinenorientiert ist, also nur Steuerbefehle für die individuelle Maschine beinhaltet und keine Problembeschreibung, wie z. B. die Rohteil- oder Fertigteilkonturen (vgl. [Eve97]). Dadurch können auch keine weiteren Informationen bzgl. des Kollisionsverhaltens vorliegen, womit die Simulation der Fertigung mittels virtueller Werkzeugmaschine seine Daseinsberechtigung hat.

Bei der häufig vorkommenden maschinellen Programmerstellung (mittels rechnergestützter CAD/CAM-Umgebung mit NC-Modul und PC-Arbeitsplätzen) (vgl. [Eve97] S. 83ff.) erfolgt die maschinenspezifische Steuerprogrammierung durch einen NC-Prozessor und einen Postprozessor. Die erforderlichen Prozessoren übersetzen Quellprogramme, die in einer problemorientierten Sprache verfasst sind (Zielgeometriekonturen, Toleranzangaben, Werkzeugangaben durch CAD/CAM-Schnittstelle), in die CLDATA³⁹-Programme. Damit wird die Bearbeitungsaufgabe spezifiziert und ist somit werkstückorientiert. Die CLDATA-Sprache ist die Eingangsgröße für den Postprozessor, der wiederum diesen Datensatz in ein maschinenspezifisches Steuerprogramm übersetzt (vgl. [Eve97] S. 78ff., [ABW+05]). Mittels Mensch-Maschine-Schnittstelle (Steuerungspanel) ist auch eine manuelle Maschinenprogrammierung möglich, die jedoch für kleinere Stückzahlen und weniger komplexe Geometrien oder Korrekturen Anwendung findet (vgl. [Eve97] S. 86).

³⁹ Cutter Location Data, DIN66215.

Als Alternative zu CLDATA, das ein Datenformat mit geringem Informationsgehalt repräsentiert, gibt es STEP bzw. STEP-NC⁴⁰ als Erweiterung. Es beinhaltet eine objektorientierte Struktur und bietet die Möglichkeit, vollständige Informationen über Maschinen- und Simulationsprozesse zu übermitteln. Es ist auch als XML-Format übermittelbar (vgl. [AXH11]).⁴¹

Die Begriffe NC- und CNC-Steuerung gehen, unabhängig ob sie dieselbe Funktion erfüllen, dahingehend auseinander, dass bei der NC-Steuerung impliziert wird, dass der Programmablauf von einem Datenträger in die Gerätesteuerung eingelesen und gleichzeitig ausgeführt wird. Bei einer CNC-Steuerung wird davon ausgegangen, dass das NC-Programm in einem geräteeigenen Speicher eingelesen und von dort ausgeführt wird sowie Änderungen vorgenommen werden können (vgl. [Dan09] S. 1355). In der Praxis ist somit Letzteres der korrekte Begriff, wenn wir von NC-Steuerung sprechen. In der heutigen Zeit ist Speicherplatz aus Kostensicht sekundär anzusehen (vgl. [Mak16-ol], [Hei12-ol]), wodurch, wenn von NC-Programm gesprochen wird, in der Regel von einem CNC-Programm auszugehen ist.⁴² Ebenfalls sind die Begriffe CNC-Maschine und NC-Maschine hierbei äquivalent zu betrachten. CNC-Programme bieten noch einige Zusatzfunktionen, die in die Betriebsdatenerfassung einfließen. Dazu zählen auch die Werkzeugverschleißkorrektur und die Standzeitüberwachung, der Werkzeugwechsel und ggf. die grafische Simulation der Werkstückbearbeitung direkt an der Werkzeugmaschine (vgl. [Dan09] S. 1355).

Im sog. DNC⁴³-Betrieb sind mehrere CNC- und NC-Maschinen mit einem Leitrechner verbunden, der die NC-Programme in einer bibliothekartigen Applikation verwaltet und diese entsprechend der zeitlichen Planung an die Maschinen verteilt. Änderungen und Umprogrammierungen können zentral an dem Leitrechner erfolgen. Der Einsatz eines Leitrechners erlaubt zudem erweiterte Funktionen wie z. B. die Steuerung des Auftragsablaufs im Produktionssystem, Ausgabe von Zustandsmeldung über den Produktionsprozess und dessen Fortschritt, Rückübertragungen von an der Maschine veränderten NC-Programmen, Einbeziehung von Messmitteln und anderweitige Handhabungs- und Produktionssteuersysteme. Der Leitrechner dient ergänzend als Diagnose-, Auswertungs- und Erfassungswerkzeug produktionsrelevanter Daten (vgl. [Dan09] S. 1355).

Die Grundform eines NC-Programms wird in eine sequenziell angeordnete ablesbare Form, in sog. NC-Sätze, gegliedert, die von der Steuerung gelesen werden können. Die Sätze sind nach DIN 66025 aufgebaut und enthalten dabei einzelne Funktionen: die G- und M-Funktionen. Die G-Funktion repräsentiert dabei Wegbedingungen, wie z. B. die Geradeninterpolation, die Ebenen-Auswahl oder die linke/rechte Werkzeugkorrektur

⁴⁰ STEP geht aus der DIN EN ISO 10303 als „**S**Tandard for the **E**xchange of **P**roduct model data“ hervor (vgl. [AnTr00]). STEP-NC steht für „**S**Tandard for the **E**xchange of **P**roduct model data for **N**umerical **C**ontrol“.

⁴¹ Hierbei sei auch auf das Datenformat AML verwiesen (vgl. Anhang A1.6 und [ScLü15]).

⁴² Auch in der vorliegenden Arbeit ist bei dem NC-Programm auch das CNC-Programm gemeint.

⁴³ DNC steht für „**D**istributed **N**umerical **C**ontrol“ (vgl. [WeBr06]) und wurde früher als „**D**irect **N**umerical **C**ontrol“ bezeichnet.

(vgl. [FGH+11], [FGH+08] S. 382ff.). Die M-Funktion liefert Informationen zu den Zusatzfunktionen, die bei der Bearbeitung hinzugezogen werden. Beispiele für M-Funktionen sind die Funktion „Kühlschmiermittel EIN/AUS“ (M07/M09) oder „Programmende mit Rücksetzen“ (M30). In Tabelle 2 ist ein NC-Satz schematisch dargestellt. Einzelne G- und M-Funktionen einer CNC-Fräsmaschine sind in der Tabelle 3 exemplarisch aufgeführt. Eine detailliertere Beschreibung befindet sich meist in NC-Programmierhandbüchern der Steuerungshersteller wie z. B. der Siemens AG (siehe dazu [Sin06] und [Sin13]) (vgl. [FGH+11], [FGH+08]).

Tabelle 2: Darstellung der Satzelemente eines NC-Satzes (vgl. [Eve97])

N...	G01	X..	Y..	F...	S...	T..	M..
Satznummer	Wegbedingung	Koordinaten des Zielpunkts (Z-Richtung auch möglich)		Vorschub	Drehzahl	Werkzeug	Zusatzfunktionen/-bedingungen

In NC-Programmen ist es zudem zulässig, bestimmte Adressbuchstaben als Parameter (P, Q, R) zu verwenden. Des Weiteren ist es möglich, für die Adressbuchstaben D, E, P, Q, R, U, V, W eine weitere anwenderbezogene Belegung vorzunehmen (vgl. [Dan09]).

Tabelle 3: Beispiele von G- und M-Funktionen nach DIN 66025 ([FGH+11], [FGH+08] S. 328ff., S. 392ff.)

G-Funktionen Interpolationsarten/Konturen		M-Funktionen Interpolationsarten/Konturen	
G0	Positionieren im Eilgang	M02	Programmende
G1	Linearinterpolation im Arbeitsgang	M03	Spindel im Uhrzeigersinn
G2	Kreisinterpolation im Uhrzeigersinn	M04	Spindel gegen Uhrzeigersinn
G97	Konstante Drehzahl	M06	Werkzeugwechsel
G..	...	M..	...

Eine CNC-Steuerung besteht im Wesentlichen aus dem Prozessrechner mit Ein- und Ausgang. Die Schnittstelle am Eingang stellt das Bedienungspult (Steuerungspanel) dar, das vom Maschinenbediener benutzt wird. Hier befinden sich neben einem Anzeigeelement auch verschiedene Elementgruppen zur Programmierung, Handbedienung und Betriebsarteinstellung. Ebenso finden sich an der Eingangsschnittstelle verschiedene Anschlüsse für externe Datenträger. Die Schnittstelle am Ausgang kann als Postprozessor verstanden werden. Der Postprozessor an der Ausgangsschnittstelle enthält die für die Werkzeugmaschine geeignete Anpassteuerung. Die Steuerimpulse werden im Postprozessor in Schaltimpulse für die Werkzeugmaschine umgewandelt. Zusätzlich überprüft die Anpassteuerung Eingabefehler, führt Regelungsvorgänge aus und ist mit logischen Verknüpfungen mittels digitaler Schaltungen versehen. Darüber hinaus beinhaltet der Leistungsteil die Aufgabe, schwache Steuersignale in leistungsstarke Schaltimpulse zu verstärken (vgl. [Wit86] S. 222f.).

Die unter den NC-Programmen angesprochenen Achsen unterliegen nicht unbedingt einer kontrollierten Bewegung. Die geometrischen Steuerungsarten hierzu können als Punkt-, Strecken- und Bahnsteuerung klassifiziert werden (vgl. [Dan09] S. 1355f.). Je nach Anzahl der Achsen der CNC-Maschine und der verfügbaren Bahnsteuerung verändern sich die Möglichkeiten der Bearbeitung auf unterschiedlichen Arbeitsebenen und die damit verbundenen Umspannvorgänge des Werkstücks im Arbeitsraum. Eine 2D-Bahnsteuerung ermöglicht z. B. gerade und kreisförmige Werkzeugbewegungen bei zwei festen Achsen. Wenn die CNC-Werkzeugmaschine mit drei Achsen und mit einer 2D-Bahnsteuerung ausgestattet ist, ist die dritte Achse nur unabhängig von den verbliebenen zwei Achsen steuerbar. Eine 2,5-D-Bahnsteuerung hingegen ermöglicht wie die 2D-Bahnsteuerung kreisförmige und gerade Werkzeugbewegungen. Die Werkzeugbewegungen können in mehreren Arbeitsebenen erfolgen, bei denen allerdings immer nur zwei Achsen bzgl. ihrer Bewegungen aufeinander abgestimmt werden können. Zusammengefasst bedeutet das für eine 3-Achs-CNC-Maschine, dass mit den Bewegungsachsen⁴⁴ X, Y und Z wahlweise nur die X- und Y-Achsen, X- und Z-Achsen oder Y- und Z-Achsen gleichzeitig gesteuert werden können. Wenn die CNC-Maschine mit einer 3D-Bahnsteuerung ausgestattet ist, dann sind neben der geraden und kreisförmigen Bewegung in der Ebene auch gerade und kreisförmige räumliche Werkzeugbewegungen möglich. Alle drei Achsen können bzgl. ihrer Bewegungen aufeinander abgestimmt werden (vgl. [Dan09] S. 1356).

Das kinematische Verhalten der einzelnen Achsbewegungen unterliegt hier den Regeln für kinematische Ketten. Bei Anlagen, die mit einer parallelen Kinematik ausgestattet sind, können mehrere Achsen parallel zeitgleich angesteuert werden. Bei 5-Achs-CNC-Maschinen gelten prinzipiell identische Voraussetzungen. Sie beinhalten neben den linearen Achsen noch zwei Dreh- bzw. Schwenkachsen, die mit einem vergleichbaren Prinzip angesteuert werden wie bei der 3-Achs-CNC-Maschine.

Die Wegmessung der verschiedenen Komponenten einer CNC-Werkzeugmaschine kann indirekt oder direkt erfolgen sowie in absolutem oder inkrementellem Maße. Die direkte Wegmessung wird mittels Abtasten eines Maßstabes gewährleistet, während die indirekte Wegmessung über die Drehbewegung der Spindel⁴⁵ oder eines Getriebes in den zurückgelegten Weg umgerechnet wird. Eine absolute Wegmessung erfolgt immer in Bezug zu einem festen Nullpunkt. Bei der inkrementellen Wegmessung muss bei jedem Einrichten der CNC-Maschine der Nullpunkt neu festgesetzt werden. (vgl. [Dan09] S. 1356)

⁴⁴ Die X, Y, Z-Achsen sind hier nur die Bewegungs- bzw. Maschinenachsen und sind nicht zu verwechseln mit den Koordinatenachsen x, y und z.

⁴⁵ Die hier angesprochene Spindel meint nicht die Werkzeugaufnahmen und -führung (Rotation z. B. um die Z-Achse), sondern die (Antriebs-)Spindel der Maschinenkomponenten, die z. B. den Maschinentisch oder den Schlitten (Führung) bewegen.

3.1.2.2 Grafische Simulation von NC-Programmen

Als Teil der Programmierung der NC-Programme im Rahmen der Arbeitsvorbereitung, losgelöst von der Konstruktion oder der Programmierung von Maschinen auf der Werkstattebene, erfolgt hierbei die Programmerstellung zumeist grafisch-interaktiv. Eine enge Kopplung mit Produktdatenmodellen bis hin zur Kollisionskontrolle (vgl. z. B. [LeRe11]) durch eine Fertigungsprozesssimulation anhand eines virtuellen Maschinenmodells ist die Regel. (vgl. [Eve97] S. 240)

Grafische Programmtestsysteme stellen auf Bildschirmen die programmierten Verfahrene zusammen mit den entsprechenden Werkzeugen dar. Der Programmtest beschränkt sich dabei häufig auf eine geometrische Überprüfung des NC-Programms (vgl. [WeBe91] S. 118). Für die NC-Programmevaluation gibt es dazu noch webbasierte Dienste, die auch mit Applikationen aus VR gekoppelt sind und sogar das kinematische Zusammenspiel zwischen Maschinenverhalten und Materialabtrag darstellen oder die gesamte Fertigungsprozesskette simulieren. Im Bereich des dynamischen realgetreuen Materialabtrags und der Rückkopplung bzgl. fehlerhafter NC-Sätze steht noch kein allumfassendes System zur Verfügung (vgl. [AXH11]), wenn auch Forschungsanstrengungen dazu existent sind und zukünftig erfolgen.

Wie aus der praktischen Anwendung bekannt, werden diese grafischen Simulationen in das Simulationssystem einer gesamten virtuellen Maschine eingebettet. Durch Einblenden von Spanmitteln und Werkzeugen können Programmierfehler vom Benutzer identifiziert werden. Aufwendige Systeme ermöglichen eine Echtzeitsimulation, bei der die Abläufe am Bildschirm exakt der Verfahrensgeschwindigkeit einer realen Werkzeugmaschine entsprechen. Der überwiegende Teil der angebotenen Simulationssysteme arbeitet ohne Echtzeit, wobei es auch hierbei erste Ansätze gibt, ein Simulationsmodell zu schaffen, das einer Echtzeitsimulation teilweise nahekommt [JWB05]. Optional kann eine Zeitberechnung anhand einer Analyse der Verfahrensbewegungen und Schnittwerte vorgenommen werden. Moderne Simulationssysteme sind in der Lage, alle Bewegungen eines Maschinenmodells in einer 3D-Umgebung darzustellen. Die früher übliche 2D-Darstellung von Arbeitsraumkomponenten wird heute kaum noch verwendet, existiert jedoch noch immer. Die Blickwinkelnavigation im modernen Simulationssystem erlaubt insgesamt eine sehr detaillierte Betrachtung aller Bearbeitungssituationen. Einzelne Elemente des Arbeitsraumes können optional ausgeblendet werden.

Eine Abgrenzung der Simulationssysteme kann hinsichtlich des dargestellten Bearbeitungsverfahrens erfolgen. Bei 3D-Bearbeitungsprogrammen kann sich das Werkzeug in drei Achsen parallel bewegen. Die Werkzeugbahn bestimmt direkt die Werkstückform (z. B. bei 5-Achs-Fräsmaschine). Bei 2,5D-Programmen werden zwei Achsen interpoliert. Beispiele hierfür sind Bohr- und Fräsoptionen. Moderne Werkzeugmaschinen bieten sowohl Fräs- als auch Drehbearbeitung (d. h. 2,5D- und 3D-Simulationen) parallel an. Viele Technologien sind heutzutage in einer Werkzeugmaschine vereint. Die moderne Werkzeugmaschine unterstützt z. B. Fräs- sowie auch Drehprozesse, was dazu führt, dass

ein modernes Simulationssystem nicht nur in der Lage ist, „alle“ Arten der Bearbeitung zu unterstützen, sondern auch die verschiedenen Bearbeitungen am gleichen Werkstück ausführen kann (vgl. [KiRo11] S. 443). Dadurch werden die Simulationsprogramme relativ rechenintensiv und deshalb für ein iteratives Abprüfen einer hohen Anzahl zeitintensiver Fertigungsszenarien nicht verwendet.

3.1.2.3 Simulation der NC-Programme durch virtuelle Werkzeugmaschinen

Allgemein beinhaltet eine CNC-Simulation verschiedene Komponenten, die die Realität detailliert abbilden können: Dazu gehören virtuelle Modelle der Werkzeugmaschinenkinematik, Modelle der Vorschubdynamik, kontinuierliche Aktualisierungen des Materialabtrages (Materialabtragssimulation) sowie die Darstellung von Zusatzkomponenten [ABW+05]. Hierbei wurde bereits früh erkannt, dass bei 5-Achs-Werkzeugmaschinen hohe Varianzen in der Maschinendynamik bzgl. der Parameterkonfiguration vorzufinden sind. Die Analyse der NC-Programme auf verschiedenen Maschinen unter Betrachtung der erforderlichen Achsgeschwindigkeiten zeigt, dass bei Positionen, die eine hohe Vorschubrate erfordern, die dynamischen Grenzen der Drehachsen deutlich höher sein müssen, um dem programmierten Pfad realgetreu folgen zu können, als es vom CAM-System vorgegeben wird. Allgemein berücksichtigt das CAM-System spezifische dynamische Maschinenegebenheiten beim Erstellen der NC-Programme nicht, sodass eine Erprobung mittels realgetreuen Maschinenmodells erforderlich ist (vgl. [ABW+05]). Sobald ein NC-Programm mittels CAD/CAM-Umgebung erstellt wird, erlaubt die virtuelle CNC-Technologie geometrische Aktualisierungsvorgänge beim Werkzeugschnitt bzw. Werkzeugeingriff des Materials pro NC-Satz. Diese diskreten Aktualisierungsvorgänge laufen in der Simulationsumgebung mit hoher Geschwindigkeit ab, sodass der Nutzer das Gefühl kontinuierlicher Abtragsvorgänge erhält.⁴⁶ (vgl. [ABW+05]) Dabei werden während der NC-Pfad-Simulation die Vorhersage von Werkzeugkollisionen und die NC-Programmkorrektur des NC-Programms aufgrund des Pfadfehlers erlaubt (vgl. [ABW+05]). Mit der Werkzeugwegdarstellung bei einer mehrachsigen Fräsmaschine beschäftigt sich der Beitrag von *Lauwers* et. al in Form eines erweiterten CAM-Systems, was auch verschiedene Kollisionserkennungsalgorithmen anbietet. Die Werkzeugorientierung und Oberflächenbeschaffenheit wird hier fokussiert. Im Rahmen der Simulation steht aber mehr der Fertigungsprozess als solches im Fokus (vgl. [LKD+00]).

Lauwers et al. attestieren die behandelte NC-Simulation in [LDK03] als eine Lösung, Maschinentestläufe durchzuführen und den Nutzer darüber zu informieren, ob und wo ungewollte Kollisionen vorliegen. Ferner folgt die Weiterentwicklung zur Optimierung der Werkzeugorientierung, um hierbei ein kollisionsfreies Arbeiten zu gewährleisten. Auch hierbei kommt wieder ein Werkzeugpfadalgorithmus zum Einsatz (vgl. [LDK03]).

⁴⁶ Vgl. Täuschung des Sehsinns in [Lar07] S. 37.

Eine Architektur­lösung für den Werkzeugweg-Prozess eines allgemeinen CNC-Systems ist von *Altintas et al.* gezeigt (vgl. [ABW+05]). Hieraus geht auch hervor, dass der Werkzeugpfad, resultierend aus den NC-Sätzen, in Pfadsegmente unterteilt wird (vgl. [ABW+05]). Diese Segmente treten in Form von diskreten Positionsbefehlen als Funktion für die Beschleunigung und Vorschubgeschwindigkeiten durch Trajektionsalgorithmen des CNC-Systems auf (vgl. [AlEr98]). Dadurch werden für die Simulation nur Vorschübe, Beschleunigung, Kollisionserkennung und eine Fehlerreduktion für den Fertigungsprozess erzeugt. Trajektionsalgorithmen, erweitert durch eine Spline-Interpolation, um damit kontinuierliche Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsprofile generieren zu können und Vorschubfluktuationen sowie Parametrisierungsfehler zu vermeiden, sind in dem Beitrag von *Erkorkmaz* und *Altintas* gezeigt (vgl. [ErAl01]). Durch die Forschungsbeiträge wird deutlich, dass zunächst eine adäquate Simulation bzw. ein sinnvolles Erprobungswerkzeug angestrebt wird, um NC-Programme und Werkzeugpfade realgetreu zu errechnen sowie darzustellen und dabei das reale Maschinenverhalten als Vorbild zu nutzen. Der adressierte Fokus beinhaltet hierbei den Fertigungsprozess mit den Fertigungsparametern wie z. B. Vorschübe, Drehzahlen, Beschleunigungen und resultierende Bahnkurven.

Weitere Forschungsaktivitäten adressieren die Integration der Maschinenbewegung inklusive Materialabtrag als Modell, ausgehend von einer Integration der Zielgeometrieinformation aus der Rohteilinformation, um die Zielgeometrie­genauigkeit vorauszusagen und zu simulieren (vgl. [ABW+05], [BON14]). Dazu haben auch *Altintas et al.* (vgl. [YAE06]) bspw. eine konfigurierbare virtuelle CNC-Simulation entwickelt, bei der in Echtzeit experimentell erprobte und evaluierte Algorithmen aus einem offenen CNC-System importiert werden. Das heißt, dass die Nutzerschnittstellen zur Verfügung gestellt werden, um eine Anbindung an ein bestehendes System zu ermöglichen. Auf diese Weise werden neue Algorithmen, Experimente und Lösungen im Rahmen der CNC-Simulation, NC-Programmverbesserung⁴⁷ und Parametrisierung durchgeführt. Dieser Ansatz fokussiert hierbei die Verbesserung von Maschinennachbildungen und Fertigungsparametern und adressiert die maschinenseitige Steuerungskonfiguration (z. B. Vorschübe und Achswege) (vgl. [YAE06], [BON14]).

Es wurde insgesamt erkannt, dass das Zusammenspiel der einzelnen Simulationswerkzeuge verschiedener virtueller Maschinen- und NC-Systeme hinsichtlich der Darstellung und Berechnung des Maschinenverhaltens⁴⁸ nicht zu vernachlässigen ist. Dies beinhaltet dabei insbesondere die akkurate Simulation von Materialabtrag, NC-Pfad-Wiedergabe und Kollisionkontrolle, um industrielle Fertigungsprozesse zu verbessern (vgl. [ABW+05]). Dazu wurde von *Altintas et al.* (vgl. [ABW+05]) bereits ein modularisiertes Systemkonzept erwähnt, bei dem verschiedene Simulationsmodelle durch Datenschnittstellen bzw. durch eine Kommunikations-API zusammengefügt werden können.

⁴⁷ Die angesprochene NC-Programmverbesserung erfolgt indirekt, da nur die Fertigung, ausgehend von den NC-Befehlen, durchgeführt wird und keine direkte Rückkopplung, bezogen auf das NC-Programm, besteht.

⁴⁸ Hierbei liegt der Fokus auf der Interaktion zwischen Werkstück, Werkzeug und der Maschine.

Hierzu ist bspw. auch das Simulationssystem *CutS* zu nennen, das verschiedene Simulationsumgebungen koppelt (vgl. [DTR02]).

Einzelne Ansätze, basierend auf den Forschungsanstrengungen der letzten zehn bis 20 Jahre, wurden auch als kommerzielle Software in Form einer NC-Simulation oder virtuellen Werkzeugmaschine umgesetzt. Die Funktionen dieser Werkzeuge unterscheiden sich nicht gänzlich, sondern verfolgen unterschiedliche Ansätze und Techniken und unterliegen einer ständigen Verbesserung. Fokussiert wurden häufig Datenschnittstellen, grafische Darstellung, Bedienung und Nutzerfreundlichkeit, um diese Software gewinnbringend veräußern zu können.

Die Simulation kann ein Repertoire an „1:1-Maschinen-Nachbildungen“ des jeweiligen Herstellers beinhalten, wobei die (virtuelle) Maschinenausführungen inklusive Bewegungsachsen, Achsensteuerung sowie die Wegmessung einzig von der simulierten Werkzeugmaschine und deren Kinematik abhängen. Streng genommen sind sie vom Hersteller vorgegeben und können vom Nutzer nicht verändert werden. Die Firma *DMG MORI AG* bietet beispielsweise eine firmenspezifische Softwarelösung als virtuelle Werkzeugmaschine an, bei der alle notwendigen Funktionen der SPS (PLC)⁴⁹ und NC-Steuerung integriert sind. Dabei wird das Maschinenmodell als CAD-Datenmodell, basierend auf den originalen Konstruktionsentwürfen der jeweiligen Maschine, bereitgestellt. Die Maschinenprogrammierung erfolgt werkstatorientiert. Wichtige Funktionen sind nach heutigem Standard die Arbeitsraumüberprüfung sowie die Kollisionserkennung. Dabei wird keine Steuerungsnachbildung verwendet, sondern eine originale (reale) Steuerung, die mittels virtueller Maschine auf einem PC-Arbeitsplatz funktionsfähig ist (vgl. [DMG16a-ol], [DMG16-ol]).

Auf der Prozessebene erfolgt die Simulation der NC-Programme auf Basis der CAD-Daten, im Rahmen der Programmierarbeiten im Bereich der Arbeitsvorbereitung (vgl. [Eve97] S. 240). Die CAD-Daten werden durch die Konstruktion erstellt (vgl. [Eve97] S. 240). Das Vorgehen bzgl. der organisatorischen Einbindung der NC-Programmierung sowie der Simulation und Überprüfung der NC-Programme hat bis heute keine nennenswerten Änderungen zu verzeichnen. Dies sei auch durch die Ausgangssituation des Forschungsprojekts *InVorMa*⁵⁰ des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL* gezeigt: Auch hier wird festgestellt, dass das 3D-Modell mithilfe von CAD-Werkzeugen modelliert, die Werkzeugbahn durch CAM-Prozesse gestaltet und daraus das NC-Programm generiert wird. Im Anschluss werden die Daten einem Simulationsmodell übergeben, bevor die reale Produktion gestartet wird (vgl. [Jur16]). Am Beispiel der vWZM lässt sich das Verfahren wie folgt beschreiben: Das zu simulierende NC-Programm liegt als Datensatz (als eine sog. *Session*) vor, deren Dateiformat, bspw. in Form einer VMDE-Datei, in die Sitzungsordnerstruktur der Software eingebunden wird. Durch das Übertragen dieser Session in das Maschinenmodell wird der Steuerung das NC-Programm über

⁴⁹ SPS steht für **speicher**programmierbare **S**teuerung, engl. PLC, **P**rogrammable **L**ogic **C**ontroller.

⁵⁰ InVorMa steht für **I**ntelligente **A**rbeits**v**orbereitung auf Basis virtueller Werkzeug**m**aschinen.

die festgelegten Kanäle übermittelt, und die Maschine arbeitet das Programm originalgetreu ab. Kollisionen, die Werkzeugbewegung und das zugehörige Maschinenverhalten (inklusive Werkzeugwechsel) werden dem Nutzer als visuelles Modell über das Ausgabegerät angezeigt. Eine Konsolenausgabe protokolliert alle fertigungstechnisch relevanten Vorkommnisse wie z. B. Kollisionen. Fehler, die bei bestimmten NC-Sätzen auftreten, werden nur als Ausgangstext in der Steuerung angegeben. Sie werden automatisch aber nicht weiterverarbeitet, sodass hier ein manuelles Eingreifen unumgänglich ist und ggf. eine Änderung des NC-Programms durch den Nutzer erfolgen muss, um im Anschluss erneut die Simulation zur vollständigen NC-Programmabsicherung anzusteuern (vgl. [DVM16-ol]).

Das Maschinenmodell verhält sich bei der Berechnung von Vor- und Rückwärtskinematik⁵¹ wie eine reale Maschine und bietet insgesamt eine nutzbare Rückkopplungsmethode zur Dauer von Fertigungsprozessen und Validierung von NC-Programmen. Die Genauigkeit der Anzeige und Berechnung zwischen den simulierten Werkzeugbewegungen im Wechselspiel mit dem Bauteil und der damit verbundenen Materialabtragssimulation (vgl. Kapitel 3.1.3.3.2) hängt unmittelbar mit der Beschaffenheit des Modells und der Rechenleistung zusammen. Zur Kollisionserkennung gibt es verschiedene Verfahren (vgl. Kapitel 3.1.3.3.1).

Durch die von *Lee* und *Ren* (vgl. [LeRe11]) vorgestellte Kollisionserkennung erfolgt hierbei auch eine Überprüfung des NC-Programms hinsichtlich geometrischer Fehler. Dabei wird hier zwischen Komponentenfehler (geometrische Strukturen der Simulation, *component error*) und Standortfehler (*location error*) unterschieden. Die Komponentenfehler treten dabei zwischen den Achsen der beteiligten Komponenten auf (jede Achse besitzt dabei sechs Freiheitsgrade) (vgl. [LeRe11]). Das kommt quasi der Unterscheidung in technologische und geometrische Fehler nahe, sodass diese Verfahren zur NC- und Werkzeugmaschinen-simulation noch immer aktuell sind.

Die Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über Beispiele von marktüblichen Softwarewerkzeugen zur Simulation von Werkzeugmaschinen, Robotern sowie Überprüfung von NC-Programmen und ganzen Fertigungsprozessen. Die Übersicht hat nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

⁵¹ Unter der Voraussetzung, dass eine Berechnung der Rückwärtskinematik möglich ist.

Tabelle 4: Vergleich marktüblicher Testumgebungen für NC-Programme, CNC-Maschinen-Simulationen und CAM-Programme

	Simulation	Kollisionsüberwachung	Darstellung/Modelle	Werkzeug/Werkstück	Materialabtrag	NC-Programmierung	Schnittstelle	Zeitberechnung
<i>DMG-Mori Mfg-Suite NC Simulation</i> ⁵²	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente	ja	3D	Positionierbar, darstellbar, konfigurierbar	ja	Ja	Ja, gängige CAD/CAM, VMDE, externe Ansteuerung, API	ja
<i>Siemens Tecnomatix Real-NC</i> ⁵³	NC-Programm, Fertigungsprozess, maschinenspezifische Simulation, Peripherieelemente	k. A.	3D	Realitätsgetreue Darstellung, konfigurierbar, Werkzeugweg definierbar	ja	Ja	k. A.	k. A.
<i>INDEX Virtual-Line</i> ⁵⁴	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente	ja	3D	Darstellbar, Standardwerkzeuge	ja	ja	Vereinzelt, Export an reale Maschine	k. A.
<i>VERICUT</i> ⁵⁵	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente	ja	3D	Dargestellt, Standardwerkzeuge, Mehrfachfräsen, -bohren, -drehen, konfigurierbar	ja	ja	Import Geometrie-daten, Steuerungs-daten	k. A.
<i>EUREKA NC-Code</i> ⁵⁶	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente, kann andere vWMZ abbilden	ja	3D	Interaktive Werkzeugwege, -längenoptimierung, darstellbar, konfigurierbar	ja	ja	Ja, gängige CAD/CAM, API	k. A.
<i>Machine-Works</i> ⁵⁷	Fertigungsprozess, CNC-Simulation,	ja	3D	k. A.	ja	k. A.	k. A.	k. A.
<i>TIBEK CNC-Simulator</i> ⁵⁸	Spezialisiert nur auf Holzbearbeitung,	ja	3D	Einlesen eigener Werkzeugdaten, darstellbar, konfigurierbar	ja	nein	Gängige Maschinen- u. Werkzeugdaten	ja
<i>Intelitek CNC Motion</i> ⁵⁹	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente	ja	3D	Darstellbar, konfigurierbar, Werkstück/ Material konfigurierbar	ja	ja	CAD/CAM-kompatibel	k. A.

⁵² [DVM16-ol]

⁵³ [Rea08-ol]

⁵⁴ [IND17-ol]

⁵⁵ [CGT17-ol], CGTech ist ein Dienstleister, der Simulationsmodule für Maschinenhersteller wie die DMG MORI AG anbietet.

⁵⁶ [Eur17-ol]

⁵⁷ [Mac17-ol]

⁵⁸ [TIB17-ol]

⁵⁹ [Int16-ol]

<i>Cutviewer</i> ⁶⁰	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente, Standard-G-Code	ja	3D	Werkstück/ Werkzeug definierbar, darstellbar	ja	ja	k. A.	k. A.
<i>SPRING NC SIMUL</i> ⁶¹	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente	ja	3D	Werkzeugwege, Werkzeuglängenoptimierung	ja	ja	2D/3D-Datenschnittstelle	k. A.
<i>Coppelia Robotics V-REP</i> ⁶²	Nur kinematische Überwachung/ Darstellung	k. A.	3D	Definition durch Baukastenprinzip und Skripte	ja	nein	API	k. A.
<i>MecSoft Corp. RhinoCam 2017</i> ⁶³	NC-Programm, Fertigungsprozess, Peripherieelemente	ja	3D	Werkstück und -zeug darstellbar, Werkzeugwege definierbar	ja	ja	k. A.	k. A.

Insgesamt sind zwischen den angeführten Softwarewerkzeugen keine nennenswerten Stärken oder Schwächen als hartes Abgrenzungskriterium benennbar. Alle Produkte nehmen eine Kollisionskontrolle vor und stellen die Simulation als 3D-Modell dar. Es gibt Unterschiede in dem Detailgrad der Simulation bzgl. der Darstellung ganzer Maschinen oder alleiniger Werkzeugpfade. Eine NC-Programmierung ist bei fast allen Softwarewerkzeugen vorgesehen. Ausreichend Schnittstellen zur Verarbeitung von Ergebnissen sowie zum Verwalten von Produkt-, Geometrie- sowie Auftragsdaten sind vorhanden. Die virtuelle Werkzeugmaschine der *DMG MORI AG* beinhaltet allerdings eine externe Ansteuerung, sodass hier eine Automatisierung von ganzen Simulationsreihen möglich ist und diese Funktionalität für den hier entwickelten Ansatz der Werkstückpositionierung genutzt werden kann. Die Angaben basieren auf Datenblätter der einzelnen Produkte. Im Rahmen der Arbeit gab es nur einen Zugang zu der vWZM der *DMG MORI AG*. Insgesamt kann anhand des Vergleichs festgehalten werden, dass keine zusätzlichen (unzulässigen) Einschränkungen durch die Verwendung der vWZM der *DMG MORI AG* bestehen.

3.1.3 Virtuelle Werkzeugmaschine

Eine wichtige Funktion ist die Validierung verbundener Fertigungs- und Produktionsprozesse, ohne dabei physikalisches Material sowie Betriebsmittel zu verbrauchen, die reale Maschine zu beschädigen oder Werkzeuge abzunutzen. Nach *Kühn* wird eine Simulation (wie die virtuelle Werkzeugmaschine) zur Bauteilefertigungssimulation als *digitale Manufacturing-Lösung* bezeichnet und innerhalb der digitalen Fabrik den 3D-Bewegungssimulationen zugeordnet (vgl. [Küh06] S. 74f.). In der betrieblichen Praxis werden diese Simulationen zur Analyse, Simulation und Optimierung von Fertigungsszenarien, die sowohl Werkzeuggeometrien als auch Kinematikmodelle abbilden. (vgl. [Küh06])

⁶⁰ [Cut13-ol]

⁶¹ [NCSimul17-ol], *SPRING NC SIMUL* bietet ebenfalls die Abbildung von diversen Maschinen, wie z. B. von *DMG MORI AG*.

⁶² [VREP16-ol]

⁶³ [Rhi17-ol]

Bei der Simulation von der Aufspannsituation des Werkstücks können Reihenfolgen und Bearbeitungswege dargestellt und die Fertigungszeit, bezogen auf das Gesamtszenario, wiederholt neu berechnet werden, bis eine näherungsweise optimale Lösung⁶⁴ gefunden wird. Bei der Simulation von Verfahrbewegungen⁶⁵ werden möglichst schnelle und auch kurze Bewegungsvorgänge der Bearbeitung angestrebt, was z. B. durch kürzere Rückzugswege des Werkzeugs erreicht wird. Die Simulation von CNC-Maschinen hat sich daher als Standardverfahren für komplexe spanende Bearbeitungsprozesse positioniert und wird durch verschiedene Forschungseinrichtungen weiterhin erforscht. Dabei werden neuartige Maschinenkonzepte, leistungsstarke Rechner, automatische Steuerungs-, Transport- und „Handlingsysteme“ sowie intelligente Überwachungssysteme mit einbezogen. Auch in Bezug auf Ökologie, Ressourcenschonung und Energieeffizienz werden Überlegungen von Seiten der Werkzeugmaschinen- und Steuerungshersteller angestellt, wie NC-Teilprogramme sinnvoll umgesetzt werden können (vgl. [KiRo11] S. 22). Die Tabelle 5⁶⁶ listet beispielhaft aktuelle Funktionen einer Maschinensimulation auf.

Tabelle 5: Beispielfunktionen einer Maschinensimulation (vgl. [Cos16a-ol])

• Vorwärts- und Rückwärtssimulation von Fertigungsprozessen	• Materialabtrag und Kollisionsprüfung
• Realitätsgetreue Darstellung aller Maschinenteile	• Unterstützung verschiedener Maschinenkinematik
• Punktuelle Visualisierung des Bauteilzustandes zur Verhinderung unproduktiver Leerwege	• 64-Bit-System-kompatibel
• Simulation synchron zur aktuellen CAM-Dateieingabe	• Geringere Einfahrzeiten des NC-Programms durch Simulation des NC-Programms/Kinematiküberprüfung

3.1.3.1 Bedienung der virtuellen Werkzeugmaschine

Die Simulation als virtuelle Werkzeugmaschine (1:1-Simulation⁶⁷) bietet den Vorteil, dass die Bedienung und Programmierung identisch mit der einer realen Werkzeugmaschine sind und ihre Steuerung einen vollständigen Funktionsumfang aufweist (z. B. Syntaxüberprüfung, Parametereinstellung, Laufzeitanalyse). Diese realitätsgetreue Abbildung erfordert jedoch ein hohes Maß an Rechenleistung, wodurch die Performance dieser Art von Simulation häufig schlechter ausfällt als beispielsweise die Simulation mit einer Steuerungsnachbildung. Da sich der Programmieraufwand von Steuerungsnachbildungen infolge komplexer werdender Werkzeugmaschinen erheblich erhöht hat und eine vollständige Abbildung der Maschine nahezu unmöglich geworden ist, wird zunehmend auf

⁶⁴ Die regulär angestrebte Lösung ist die Suche einer zunächst fehlerfreien Aufspannposition.

⁶⁵ Die Verfahrbewegungen umfassen die Bewegungsbahnen der Werkzeuge bei der Bearbeitung.

⁶⁶ Die Beispielfunktionen stammen von der Firma *Coscom GmbH*, die unter ihren „Referenzen“ Anbieter von Werkzeugmaschinen nennt, wie z. B. *DMG Mori Seiki AG* (vgl. [Cos16a-ol], [DVM16-ol]).

⁶⁷ 1:1-Simulation meint hier die realgetreue Abbildung einer Maschine mit originalgetreuem Maschinenverhalten und echter Steuerung (ohne Steuerungsnachbildung).

den Ansatz der virtuellen NC-Steuerung zurückgegriffen. Hierbei muss das Verhalten der Steuerung im Simulationssystem nicht mehr nachgebildet werden, da stattdessen eine Softwarekomponente des Steuerungsherstellers verwendet wird, die das komplette Verhalten der Steuerung beinhaltet. Hierbei wird von der Nutzung der realen Steuerung gesprochen, wie sie an einer realen Maschine auch vorzufinden ist (vgl. [JWB05], [DVM16-ol]). Allgemein wird in diesem Zusammenhang die Funktionalität einer NC-Steuerung softwaretechnisch realisiert und nicht mehr mittels Hardware. Die dabei verwendete virtuelle NC-Steuerung entspricht üblicherweise der Software einer realen NC-Steuerung, die entsprechend für handelsübliche Desktop-PCs o. Ä. angepasst wurde und eine Kommunikation mit dem Simulationssystem ermöglicht. Durch die Inbetriebnahme der virtuellen Steuerung mit Daten der realen Werkzeugmaschine stellt die virtuelle Steuerung nunmehr eine exakte Kopie der Steuerung der realen Maschine dar. (vgl. [KiRo11] S. 435)

Nach *Kief* und *Roschiwal* beinhaltet die virtuelle Werkzeugmaschine somit folgende Funktionsweisen (vgl. [KiRo11] S. 436):

- Nutzung einer Mensch-Maschine-Oberfläche⁶⁸ in der virtuellen Umgebung (meist als 1:1-Abbildung einer realen Maschine)
- Simulationsverhalten ist quasiidentisch mit dem einer realen Maschine
- Nutzung einer virtuellen NC-Steuerung mit vollständigem Funktionsumfang
- 3D-Visualisierung der Werkzeugmaschine inklusive Materialabtragssimulation und Kollisionserkennung

Bei der Maschinenbedienoberfläche der NC-Steuerung (MMI – Mensch-Maschine-Interface⁶⁹) handelt es sich üblicherweise ebenfalls um eine Softwarelösung, die im Rahmen der Simulation originalgetreu dargestellt werden kann. Auch das Maschinenbedienfeld der virtuellen Maschine als Abbild für das menschliche Auge entspricht exakt dem Original aus der Realität. Die Abbildung 2 illustriert beispielsweise ein virtuelles Bedienfeld einer Fräsmaschine, wie es auch in der realen Welt vorzufinden ist. Sämtliche Eingaben und Anzeigen stehen dem Benutzer der virtuellen Werkzeugmaschine zur Verfügung. Dadurch kann die virtuelle Maschine sowohl in einem Arbeitsvorbereitungsumfeld als auch werkstattnah z. B. für Aus- und Weiterbildungszwecke eingesetzt werden (vgl. [PKW+13]). *Pürzel* et al. entwickelten bspw. eine Kopplung zwischen realer NC-Steuerung und einer virtuellen Werkzeugmaschine für die Berufsausbildung. Dabei ist die NC-Steuerung in Form eines physischen Terminals (nicht als Softwarelösung) vorhanden, und der Aufbau der Maschinenumgebung und die Fertigung, insb. des Materialabtrags, erfolgen durch einen NC-VR-Aufbau (Hardware-in-the-Loop) (vgl. [PKW+13]). Die Idee, virtuelle Maschinen oder Arbeitsszenarien unter Anwendung von Mensch-Roboter-Schnittstellen mithilfe von Simulation und Methoden aus dem Bereich *Augmented Reality (AR)* zu trainieren, ist eine sichere Art, Fehler und Verletzungen zu vermeiden.

⁶⁸ Benutzerschnittstelle für die Darstellung der Simulation sowie der Bedienung.

⁶⁹ Benutzerschnittstelle zur Bedienung und Steuerung.



Abbildung 2: Virtuelles Bedienfeld einer Fräsmaschine DMC 835V der DMG MORI AG (vgl. [DMG16a-ol], [DVM16-ol])

3.1.3.2 Einrichtprozess der virtuellen Werkzeugmaschine

Nach Nyhuis beinhaltet das Rüsten einer Werkzeugmaschine die Arbeitsschritte *Vorbereitung*, *Maschinenrüsten*, *Einfahren* und *Nachbearbeiten* (vgl. [Nyh88]). Der allgemein erscheinende Begriff „Einfahren“ bezeichnet hierbei den ersten Probelauf am Werkstück. Dazu hat der Einrichter der Maschine verschiedene Arbeitsschritte zu verrichten, um die entsprechende Produktqualität zu erreichen. Zu den Aufgaben gehören unter Nutzung einer virtuellen Maschine die Kollisionskontrolle, eine Optimierung der Maße, der Technologie (z. B. Werkzeugauswahl) sowie die Verfahrwegkontrolle (z. B. optimale und fehlerfreie Werkzeugbahnen). Während ein Simulationssystem bei der „Maß- und Verfahroptimierung“ nur bedingt unterstützt, kann insbesondere durch die NC-Programmüberprüfung und die rechnergestützte automatische Kollisionskontrolle der Einrichtvorgang verkürzt werden ([WeBe91] S. 117). Zeitintensive Einfahrvorgänge werden somit von der realen Werkzeugmaschine auf den Computerarbeitsplatz verlagert, wodurch Kosten eingespart werden. Des Weiteren können Stillstandzeiten, Produktionsausfälle, Kollisionsrisiken sowie Ausschussproduktion durch fehlerhafte Bearbeitung aufgedeckt und minimiert werden (vgl. [KiRo11] S. 441f.).

Durch den vorangegangenen Einsatz von Werkzeugmaschinensimulation können bereits vor dem eigentlichen Einfahrprozess neuer Programme nachfolgende Fehlerarten erkannt werden:

- Fehlerhafte Programmsyntax⁷⁰ (vgl. [DIN 66025-1])
- Koordinatenfehler
- Werkzeugkorrekturschalter
- Fehlerhafte Nullpunktverschiebung
- Fehlerhafte Positionierung der Werkstücke und Spannmittel

Die Konstruktion der Werkstücke (Roh- und Fertigteile, Halbzeug) erfolgt in der heutigen Zeit überwiegend mithilfe von 3D-CAD-Systemen und kann über CAD-Schnittstellen in das Simulationsprogramm übernommen werden (z. B. in Form einer *dll-Datei*⁷¹ eingebunden in die Maschinensimulation). Einige Werkzeugmaschinensimulationen bieten

⁷⁰ Die Basis der Syntax ist die DIN 66025 (zuvor ISO 1058).

⁷¹ Dynamic Link Library unter MS Windows.

dem Nutzer integrierte einfache⁷² CAD-Funktionen (vgl. [DVM16-ol]), die z. B. das Erstellen primitiver Geometrien ermöglichen. Leistungsfähige Systeme unterstützen typische Methoden der Serienfertigung wie die Mehrfachaufspannung in Bearbeitungszentren und Mehrspindelbearbeitung an Drehmaschinen (vgl. [KiRo11] S. 437). Auch diese komplexen Simulationswerkzeuge arbeiten nach denselben Funktionsweisen wie die handelsüblichen Werkzeugmaschinen-simulationen.

Die Werkzeuge, die ebenfalls simuliert werden, können wie folgt klassifiziert werden (vgl. [KiRo11] S. 437):

- Rotationssymmetrische Werkzeuge (z. B. Bohrer, Fräser)
- Nichtrotationssymmetrische Werkzeuge (z. B. Drehwerkzeuge, einschneidige Werkzeuge/ unsymmetrische Werkzeuge)
- Komplexe Werkzeuge (z. B. Winkelbohrköpfe)

Bei der Erzeugung von Werkzeugen für die NC-Simulation existieren zwei Ansätze: Werkzeuge können entweder generiert oder zusammengesetzt werden. Bei generierten Werkzeugen legt der Benutzer zunächst über eine Parameterauswahl die geometrischen Eigenschaften des Werkzeugs fest. Anschließend erzeugt das System ein vollständiges 3D-Modell. Bei dieser Art der Erstellung, die für viele Simulationsanwendungen ausreichend ist, besteht der Vorteil, dass für die relativ einfache Werkzeugerstellung keine CAD-Kenntnisse notwendig sind. Für spezielle Bearbeitungsanforderungen reichen die vordefinierten Werkzeuge jedoch nicht aus. Hier erweisen sich unter Umständen zusammengesetzte Werkzeuge als vorteilhaft. Der Benutzer kann auf eine Datenbank mit 3D-Werkzeugeinzelteilen zugreifen, diese auswählen und zu vollständigen Werkzeugen zusammensetzen. In der Regel stellen die Hersteller der Werkzeuge die entsprechenden Datenbanken zur Verfügung. Auf diese Weise lassen sich beliebige und exakte 3D-Werkzeuggeometrien erstellen. (vgl. [KiRo11] S. 438)

Mithilfe der Grafiksimation lassen sich auch Einricht- und Rüstvorgänge simulieren. Hierbei lassen sich nicht nur die Bearbeitungswerkzeuge aus einer Datenbank heraus auswählen und die Abmessungen des Werkstücks festlegen, sondern es besteht ebenso die Möglichkeit, die Nullpunktlage zu definieren oder Schnittebenen anzugeben. (vgl. [FrKe84] S. 13ff.)

Üblicherweise werden alle physikalischen Elemente, die zu einer Werkzeugmaschinen-einrichtung als CAD-Modell bzw. geometrisches Modell hinterlegt sind, in Datenbanken oder auf Datenträger abgespeichert. Das NC-Programm liegt ebenfalls im entsprechenden Dateiformat vor, sodass beim Start der Simulationssoftware die einzelnen Komponenten nach erfolgter Maschinenauswahl vorliegen und z. B. per *Drag-and-Drop-Funktion* an die vorgesehenen Plätze im Maschinenmodell mithilfe des Eingabegeräts positioniert werden können (Maus- oder Tastatur-Bedienung). Werkzeuge können somit schnell an

⁷² Das bedeutet, dass Grundfunktionen und primitive Geometrien wie z. B. Quader oder Zylinder zur Verfügung stehen.

Werkzeugplätze und das Rohteil auf den virtuellen Maschinentisch inklusive Spannmittel positioniert werden. Durch die Positionierung von virtuellen Spannmittelmodellen soll die Kollisionserkennung so realitätsnah wie möglich funktionieren, auch wenn das simulierte Spannmittel dabei die Funktion der Verhinderung des Werkstück-Verrutschens durch Einwirken des Werkzeugs nicht erfüllt. Das NC-Programm kann in die Steuerung geladen und die Simulation kann gestartet werden (durch Betätigung des virtuellen Maschinensteuerungs-Panel). Dabei ist es wichtig, dass die vorausgewählte Werkzeugmaschine die einzelnen Komponenten und NC-Programme abbilden und durchführen kann. Die Konfiguration kann z. B. als sog. *Session* in einem spezifischen Dateiformat für zukünftige Simulationen gespeichert werden, sodass ein einmaliges Rüsten der Maschine für ein bestimmtes Szenario ausreicht (vgl. [DVM16-ol], [DMG16a-ol]). Viele Softwareanbieter bieten dafür eigens entwickelte Datenformate⁷³ und Datenschnittstellen an, die z. B. auf bestehenden Konzepten (bspw. XML-Datenformat) beruhen (vgl. [DMG16a-ol]).

3.1.3.3 Rückmeldung und Darstellung der Simulationsergebnisse

Fertige Produkte, Produktionsanlagen und Werkstücke sowie Prozesse können mithilfe einer 3D-Animation visualisiert werden. Dies kann den Vorteil mit sich bringen, auftretende Probleme und Fehler in der frühen Entwicklungsphase zu determinieren, bei der die Änderungskosten noch relativ gering ausfallen würden (vgl. [Küh06] S. 17f.). Der Vorteil der Visualisierung liegt am vereinfachten Erkennen komplexer Sachverhalte durch den menschlichen Sehsinn⁷⁴, was gerade für nichttechnische, fachfremde Mitarbeiter das Arbeiten mit Simulationen erleichtert.

Nach *Kühn* (vgl. [Küh06]) gibt es z. B. für VR-Systeme die nachfolgend genannten Einsatzmöglichkeiten, die sich auch auf Simulationen beziehen lassen. Dessen Liste ist allerdings erweiterbar, und es besteht daher kein Anspruch auf Vollständigkeit:

- Formgebung im Raum⁷⁵
- Positionierung von Körpern im Raum
- Räumliche Modellierungsarbeiten
- Beurteilung räumlicher Situationen
- Montagereihenfolgeplanung
- Unterstützung von Kreativitätstechniken
- Kooperationsunterstützung

⁷³ Zum Beispiel das eigens dafür entwickelte VMDE-Format, was für **V**irtual **M**achine **D**ata **E**xchange steht. VMDE ist ein auf XML-basierendes strukturiertes Datenformat.

⁷⁴ Einen großen Anteil der Eindrücke, die auf Menschen wirken, erfolgt durch das Sinnesorgan Auge. Im Simulationskontext wird durch die Visualisierung und die dadurch erfolgte Täuschung des menschlichen Sehens zweckmäßig hervorgerufen (einzelne Bilder werden bei ausreichend schneller Abfolge wie eine kontinuierliche Bewegung wahrgenommen). (vgl. [Lar07], S. 37ff.)

⁷⁵ Die Einsatzmöglichkeiten gelten in dimensionsreduzierter Form auch für die Ebenen-Darstellung.

Die grafische Simulation bei der Werkzeugmaschine ersetzt den Bearbeitungsvorgang der realen CNC-Maschine (bzw. NC-Maschine) bzw. wird diesem vorangestellt. Entsprechend den vorher erstellten NC-Sätzen des NC-Programms, verfährt dabei das Werkzeug auf der programmierten Bahnkurve. Die Werkzeugbewegung sowie der Materialabtrag können durch ein Ausgabegerät (Anzeige, Bildschirm) über den Sehsinn (menschliches Auge) verfolgt werden. Der Programmablauf während des Simulationsbetriebs kann hierbei entweder in Einzelschritten oder automatisch erfolgen. Auf der Anzeige wird der Zusammenhang zwischen Programmsatz und Wirkbewegung sehr transparent, wodurch sich Programmierfehler ermitteln lassen. Bei der Fehlererkennung können sowohl geometrische als auch technologische Fehler identifiziert werden (vgl. [FrKe84] S. 67). Ein geometrischer Fehler tritt auf, wenn die erstellte Konstruktionszeichnung (CAD) mit der Fertigteilkontur (Zielgeometrie) nicht übereinstimmt, und ein technologischer Fehler tritt z. B. durch fehlerhaften Materialabtrag durch eine bspw. zu hohe Vorschubeinstellung auf.

3.1.3.3.1 Kollisionserkennung

Während des Simulationsablaufs werden die (Werkzeug-)Komponenten im Arbeitsraum automatisch auf ungewollte Kollisionen untereinander (Werkzeug – Werkstück, Werkzeug – Maschine, Werkzeug – Spannmittel) überprüft. Wird dabei eine Kollision identifiziert, werden die Simulation und das NC-Programm gestoppt, und eine entsprechende Meldung an den Nutzer wird ausgegeben. Darüber hinaus erfolgt z. B. eine farbliche Kennzeichnung der betreffenden Komponenten (kollisionsbeteiligte Elemente werden spezifiziert). In manchen Simulationssystemen werden auch technische Fehler wie etwa die Bearbeitung ohne Kühlmittelzufuhr oder die Überschreitung der maximal zulässigen Drehzahl an Spindeln und Vorschubantrieben identifiziert und mit entsprechenden Warnmeldungen versehen⁷⁶ (vgl. [KiRo11] S. 439f.).

Im Hinblick auf kostengünstige Modelle, die eine adäquate Kollisionserkennung ermöglichen, wird in dem Beitrag von *Lee* und *Ren* festgestellt, dass für die Berechnung von Punktwolken als Methode zur Kollisionserkennung noch immer erhöhte Rechnerressourcen (CPU) benötigt werden. In dem Beitrag ist die Kollisionserkennung durch Scheitelpunkt-Überlappung (Überlappung einer Punktwolke, Vertex) dargestellt, bei der die überlappenden Punkte, die eine Kollision markieren, andersfarbig visualisiert werden können. Dazu ist eine Schale (mechanisches Modell) mit einer Punktwolke versehen, die die Oberfläche der Komponenten definiert. Jeder Punkt stellt damit ein Erkennungsobjekt dar, und das Kollisionssignal erfolgt genau dann, wenn sich zwei Erkennungsobjekte überlappen. Zur technischen Umsetzung wurde hierzu eine OpenCL⁷⁷-GPU⁷⁸-Architektur verwendet. Die Berechnungen für das Verfahren lassen sich damit parallelisieren. (vgl. [LeRe11])

⁷⁶ Beispiele zur Kollisionserkennung sind in [WeBe91] exemplarisch aufgeführt.

⁷⁷ OpenCL™ ist ein Standard für universelle parallele Programmierung von heterogenen Systemen (vgl. [Int16a-ol]).

⁷⁸ GPU steht für „Graphic Processing Unit“.

Gängige Kollisionsschutzsysteme bieten, basierend auf 3D-CAD-Systemen, einen Kollisionslauf in beliebigen Ansichten. Parallel zum Werkzeugverfahrweg wird hierbei ggf. der zugehörige NC-Satz visuell angezeigt. Spannelemente können bei der Darstellung grafisch ausgeblendet werden, sie werden jedoch weiterhin bei der Kollisionserkennung berücksichtigt. (vgl. [WeBe91] S. 129) Die Warnmeldung über Kollisionen müssen während des Programmablaufs nicht zwingend angezeigt werden. Einige Lösungen bieten eine Reportfunktion am Ende des Simulationsdurchlaufs an (vgl. [DVM16-ol], [DMG16-ol]).⁷⁹

Eine besondere Eigenschaft und zugleich Herausforderung der Kollisionskontrolle resultiert aus der kontinuierlich erscheinenden Geometrieänderung des virtuellen Werkstücks durch die Bearbeitungssimulation und somit der stetigen Neuberechnung und Neuprüfung der Kollision unter konstanter Aufspannposition (vgl. [ABW+05]).

Ende der 1990er Jahre und in den früheren 2000er Jahren wurden für die Kollisionserkennung Maschinenbewegungen als kinematische Modelle auf Basis der CLDATA aus der CAD-Umgebung genutzt und erforscht, was sich bis zu aktuellen Softwareprodukten durchgesetzt hat (vgl. [KLB+99], [ABW+05]). Daneben gibt es noch die Datenformate STEP und STEP-NC (vgl. [AXH11]) und AML (vgl. [ScLü15]), die einen höheren Informationsgehalt übermitteln können und vergleichbar sind mit dem VMDE-Datenformat (vgl. [DMG16-ol], [DMG16a-ol]) auf XML-Basis.

3.1.3.3.2 Materialabtrag

Beim Materialabtrag findet die „*Interaktion zwischen dem Werkstück [und dem einwirkenden] Werkzeug[modell] statt*“ (vgl. [Sta06] S. 49), und stellt die zentrale Funktion in der Zerspannsimulation dar (vgl. [Sta06] S. 49). Materialabtrag ist aus Sicht der Kollisionskontrolle ein wichtiges Element: „*Eine vollständige Kollisionserkennung setzt die Berücksichtigung der Werkstückgeometrieänderung während der NC-Bearbeitung voraus. [...] Die Berücksichtigung des Materialabtrags liefert nicht nur eine Aussage bezüglich der Kollisionsfreiheit, sondern ebenfalls bezüglich der richtigen Bearbeitungsreihenfolge*“ (vgl. [Sch92] S. 22). Der Materialabtrag ist zudem wichtig, da dadurch „*Rückschlüsse auf den gesamten Prozessverlauf*“ erfolgen können (vgl. [Sta06] S. 49). Hierdurch sind u. a. „*Vorhersagen [...] zu erwarteten Zerspankräften, Verschleiß [und der] Oberflächenqualität möglich*“ (vgl. [Sta06] S. 49).

Bei der Drehbearbeitung reduziert sich die Darstellung des Materialabtrags auf ein zweidimensionales Problem (rotationssymmetrisch), für welches bereits leistungsfähige Algorithmen zur Verfügung stehen. Die allgemeine Bohr- und Fräsbearbeitung in drei bis

⁷⁹ Die rechnerbasierte Kollisionserkennung wird entweder auf Basis der realen Bauteil- und Werkzeuggeometrien oder auf Basis von Hüllkörpern durchgeführt (vgl. [Sch92] S. 20f.). Des Weiteren kann zwischen statischer und dynamischer Kollisionskontrolle unterschieden werden (vgl. dazu [Sch92] S 20f. und 93 ff.).

fünf Achsen erfordert aufwendige und komplexe Rechenverfahren. Wie bei der automatischen Kollisionskontrolle müssen alle an der Bearbeitung beteiligten Komponenten als 3D-CAD-Modelle vorliegen (vgl. [Sch92], S. 22f.).

Nachdem die Simulation gestartet worden ist, wird das NC-Programm, äquivalent zur Arbeit an realen Werkzeugmaschinen, abgearbeitet. NC-Sätze werden vom Simulationssystem aufbereitet und anschließend in virtuelle Maschinenbewegungen umgesetzt. Der Materialabtrag und der Bearbeitungsfortschritt am Werkstück werden visualisiert, wobei die neu entstandenen Flächen am Werkstück entsprechend der bearbeitenden Werkzeugschneide farblich gekennzeichnet werden. Diese Operationen können hohe Rechenzeiten mit sich bringen, wenn bedacht wird, dass bei der spanenden Fertigung Material entnommen wird und die dadurch neuentstehenden Kanten immer neue Flächen am virtuellen Werkstück aufspannen. Ebenso kann die Werkzeugbahn während der Bearbeitung angezeigt werden. Die Operationsreihenfolge der Werkstückbearbeitung ist auf diese Weise nachvollziehbar (vgl. [KiRo11] S. 439).

Für die Materialabtragsberechnung und -simulation sind zunächst die Modellierungstechniken *CSG*⁸⁰ (vgl. [SAK90]), *Brep*⁸¹ (vgl. [YiHu04]) und *z-Buffer* (vgl. [YiHu04]) zu nennen. Bei der Verwendung dieser Modellierungstechniken für die Materialabtragsdarstellung ergibt sich das Problem, dass nicht alle Algorithmen die Gesetze der Schneidmechanik beachten und somit nicht den wahren Schnittprozess darstellen. Auf dieser Basis wird auch die NC-Programmoptimierung ungenau bzw. verfälscht (vgl. [ABW+05], [DVM16-ol]).

Surmann (vgl. [Sur06]) hat in seiner Arbeit ein Verfahren entwickelt, Werkzeugschwingungen in einer Simulationsumgebung bei der spanenden Bearbeitung von Freiformflächen darzustellen und zu errechnen, um das NC-Programm und die Parametrierung zu verbessern. Dabei wird auch auf die Modellierung der entstandenen Oberfläche eingegangen, sodass Rautiefen simuliert werden, die durch den Materialabtragsvorgang entstehen. Dabei ist der Fräsprozess mengentheoretisch betrachtet worden (vgl. [Sur06] S. 21ff.), wodurch der Materialabtrag als substitutives Verfahren durch ein mengentheoretisches Modell dargestellt werden kann.

3.1.3.3.3 Maschinen-, Schnitt- und Fertigungsparameter

Neben der Materialabtragsberechnung und -simulation sind bei der spanenden⁸² Bearbeitung im Rahmen der Arbeitsvorbereitung insbesondere die An- und Vorgaben zu den Schnitt-, Maschinen- und Fertigungsparametern zu beachten. Diese Parameter hängen von der Maschinen-, Werkstoff- und Werkzeugauswahl sowie der Konstruktion des Werkstücks (Zielgeometrie) ab. Unter Maschinenparameter fallen Eigenschaften der Maschine wie die Eilgang-Geschwindigkeit, die Achsauflösung, der Maschinennullpunkt,

⁸⁰ CSG steht für **C**onstructive **S**olid **G**eometry.

⁸¹ Brep steht für **B**oundary **r**epresentation.

⁸² Hier ist die fräsende Bearbeitung fokussiert.

maximale Verfahrswege, Leistungsangaben oder Maschinensteifigkeit. Schnittparameter (Schnittgrößen) beziehen sich auf den durchgeführten Zerspanprozess (vgl. [GrFe07]). Dazu gehören z. B. Schnittgeschwindigkeit, -breite, -tiefe, -kraft, Spanwinkel und Zahnvorschub. Diese Parameter werden häufig in Verbindung mit geometrischen Werkzeugangaben in Tabellenform oder als elektronischer Werkzeugkatalog vom Hersteller bereitgestellt (vgl. [Mik16-ol], [Lan16-ol]). Einige Parameter, die sich auf den Zerspanprozess beziehen und als Schnittparameter angegeben sind, können allgemeiner auch als Fertigungsparameter bezeichnet werden. Eine klare Abgrenzung ist hierbei nicht immer möglich. Zu den Fertigungsparametern können ferner Vorschub, Zustellung, Schrittweise, Kühlmittel, Werkstoffbeschaffenheit und Rohteileigenschaften wie Rautiefen, Freiflächenaufmaß o. Ä. gezählt werden (vgl. [Brö08]).

3.1.3.3.4 Bearbeitung von NC-Programmen

Während die Simulation ausgeführt wird, kann zu jeder Zeit die Darstellung der momentan ausgeführten NC-Programmzeile bzw. des aktuell ausgeführten Unterprogramms erfolgen. Manche Simulationssysteme bieten die Möglichkeit, jederzeit den Programmtext zu bearbeiten und vorgenommene Änderungen umgehend zu testen. Für eine auf die Millisekunde genaue Analyse und Optimierung werden die Bewegungsabläufe an der virtuellen Werkzeugmaschine zu jedem Interpolationszeitpunkt einzeln simuliert (vgl. [KiRo11] S. 441). Insbesondere bei der Serienfertigung kommt es während des laufenden Fertigungsbetriebs infolge von z. B. Geometrie- oder Toleranzänderungen am Werkstück häufig zu Änderungen am NC-Programm. Die Eingabe der Änderungen kann über einen Editor oder direkt über das Bedienfeld an der Werkzeugmaschine erfolgen oder vorab im Rahmen der Arbeitsvorbereitung, was wiederum im Betriebsablauf ggf. abteilungsübergreifend kommuniziert werden muss. In der Regel können die geplanten Änderungen am NC-Programm bereits vorab am PC simuliert, geprüft und anschließend in die Maschinensteuerung übertragen werden. Auf diese Weise kann die Fertigungsanlage ihre Produktion fortsetzen und die Stillstandzeit wird reduziert (vgl. [KiRo11] S. 443). Die simulierten NC-Programme werden im Einzelsatz- oder Automatikmodus durchlaufen und können dabei jederzeit editiert werden (vgl. [KiRo11] S. 444).

3.2 Werkzeugpositionierung

3.2.1 Werkzeug für die Werkzeugpositionierung

Wie von *Eversheim* (vgl. [Eve97]) bereits angedeutet, werden im Rahmen der Planung und Durchführung der NC-Programmierung Schnittstrategien festgelegt, die die Reihenfolge der Fräswerkzeuge nach abzutragendem Material⁸³ bestimmen. Hierbei werden die Werkzeugwege „optimiert“, wodurch die Anzahl der Werkzeugwechsel ebenfalls „optimiert“ wird (in der Regel minimiert). Die Festlegung der Werkzeugeinsatzstrategien mit

⁸³ Hieran angelehnt ist die fertigungsbezogene Bemaßung der Konstruktionsmodelle der Werkstücke.

den dazugehörigen Werkzeugdispositionen wird durch sog. *Tool-Management-Systeme* rechnergestützt durch den Nutzer durchgeführt (vgl. [Eve97]). Bei der Werkzeugeinsatzplanung werden die Werkzeuge ermittelt, die für eine oder mehrere Bearbeitungsaufgaben (spanende Eingriffe am Werkstück) geeignet sind. Wenn ein Werkzeug dabei mehrere Aufgaben erfüllen kann, ist dies vorteilhaft für die Einsatzplanung, da die Werkzeugwechselfvorgänge innerhalb der Magazinumgebung während der Fertigung verringert werden, sollten die Operationen, bei denen dieses Werkzeug verwendet werden kann, nacheinander folgen.⁸⁴ Auch wird ein Aus- und Einwechseln durch zusätzliche Werkzeuge außerhalb der Maschinenumgebung vermieden. Die Daten für das TMS werden in Datenbanken hinterlegt, wobei auch die geometrischen und technologischen Merkmale korrekt zu hinterlegen sind. Besonders wichtig ist, hierbei die Vollständigkeit und Kontinuität einzuhalten, um Informationslücken zu vermeiden (vgl. [Eve97]). Die Nutzung von elektronischen Werkzeugkatalogen, die durch Hersteller bereitgestellt werden, schränkt die Gefahr von entstehenden Informationslücken⁸⁵ ein (vgl. [ABW+05]).

Nach heutigem Stand gibt es verschiedene Werkzeugwechselfvorrichtungen, bei denen Fertigungszentren mit Werkzeugmagazinen hoher Kapazität ausgestattet werden. Dazu gibt es Magazinbestückungsvorrichtungen, bei denen Werkzeuge mithilfe von Industrierobotern (IR)⁸⁶ eingerichtet werden anstelle der manuellen Werkzeugmagazinbestückung durch den Werker. Diese Vorrichtungen sind mit speziellen Werkzeuggreifern ausgestattet (vgl. Hajicek in [Kat16]). Die Funktion des Werkzeugwechselprozesses sowie der Bestückungsvorgang als solches bleiben aber in abstrahierter Form unverändert. Bei älteren Maschinen bzw. Magazinen mit geringerer Kapazität ist der manuelle Bestückungsvorgang noch häufig anzutreffen, was mit der Größe der Fertigungszentren sowie ferner der Fabriklayoutplanung zusammenhängt. Auch die Betriebsgröße sowie Werkstattausstattung sind hierbei wichtige Faktoren.

Hajicek in Katalinic (vgl. [Kat16]) stellen einen aktuellen Trend beim Verkauf von Maschinen und Fertigungszentren vor, bei dem die Hersteller die zugehörige Planungs- und Simulationssoftware sowie Maschinenperipherie, Werkzeuge und Rüstbestandteile mit anbieten. Somit werden vollständige technologische Bestandteile für die Maschine und die Fertigung aus einer Hand angeboten, was aus Kundenbindungsgründen strategisch sinnvoll ist. Dabei gilt es, Kunden(an)forderungen zu erfüllen, was durch virtuelle Fallstudien mithilfe von Simulation ermöglicht wird. Das damit einhergehende *virtual prototyping* ist nach Hajicek (vgl. [Kat16]) erfüllt, wenn das virtuell vorgestellte Maschinenmodell mit der „späteren“ Realität⁸⁷ übereinstimmt. Dabei dienen die Simulation und die

⁸⁴ Auch verringern sich die Werkzeugwechsel, wenn unterschiedliche Schnitte mit identischem Werkzeug erfolgen können (Multiwerkzeugköpfe)

⁸⁵ Die Informationslücke entsteht durch eine unvorteilhaft lückenhafte Datenhaltung. Dessen Vermeidung erfordert eine sorgfältige Datenpflege.

⁸⁶ Mit dem Begriff Industrieroboter ist der industrielle Manipulator gemeint.

⁸⁷ Die spätere Realität umfasst hierbei die zum Kauf angebotene und durch Simulation vorgestellte Maschine im Fertigungsbetrieb beim Kunden vor Ort.

von *Katalinic* (vgl. [Kat16]) angedeutete „Optimierung⁸⁸“ der Werkzeughandhabung als Planungswerkzeug für den Aufbau neuer Maschinen und Fertigungssysteme bei potenziellen Abnehmern. In dem Beitrag von *Hajicek* in *Katalinic* (vgl. [Kat16]) werden zwei Werkzeugwechselallokationen demonstriert, bei denen zum einen die Werkzeuge in einer „Kreisarena“ positioniert werden und der Industrieroboter die Werkzeuge „optimal“ organisiert und dem Fertigungszentrum zur Verfügung stellt. Die zweite Werkzeugallokation adressiert eine hohe Anzahl an Werkzeugen, die in einem 3D-Layout, bestehend aus drei Kreisarenen, angeordnet sind. Die dargestellten Werkzeugallokations-Lösungen beinhalten hier jeweils drei Werkzeugenebenen. Im zweiten Ansatz wird das Werkzeugmagazin auch durch einen Industrieroboter bestückt. Verglichen werden die beiden Ansätze mit einem System ohne Werkzeugwechsellayout (ohne IR). Die Ergebnisse zeigen, dass die Werkzeugwechselzeit sich durch den Robotereinsatz verringert (von 30 Einheiten auf 8 bzw. 9 Einheiten). Jedoch ist die Anzahl der Werkzeuge in der Werkzeugpositionsvorrichtung auch höher (von 63 auf 137 Stück bzw. 432 Stück). Die Kosten der Layout-Vorschläge mit dem Robotereinsatz betragen allerdings 129.500,00 Euro und 185.000,00 Euro (beide Ansätze). Die behandelten Layout-Vorschläge ohne die Werkzeugwechselvorrichtung durch IR werden mit 14.800,00 Euro veranschlagt. Da bleibt die Bewertung offen, ob der Mehraufwand in Geldeinheiten für die Werkzeugwechselvorrichtung mittels IR die Entscheidung zugunsten dieser Vorrichtung ausfallen lässt, was möglicherweise an anderer Stelle einer Organisation entschieden wird.

Auf Prozessplanungsebene gibt es bereits erste Ansätze, eine Werkzeugallokation vorzunehmen, die die Fertigungskosten senkt. Dies wird durch die Ausnutzung einer Doppelbelegung von Magazinplätzen durch Zwillingswerkzeuge/ Duplikate ermöglicht. Somit werden auch Wechselzyklen verringert. Dabei werden operative Kosten, Wechselgeschwindigkeiten, Magazingröße/ -kapazität, Beschleunigung des Wechselsystems, Werkzeugwechsellpunktkoordinaten und die Losgröße berücksichtigt. Das dafür von *Avci* und *Akturk* vorgestellte mathematische Modell ist durch einen zwei-phasigen Ansatz gelöst worden: Die erste Phase ist ein *preprocessing* für die Eingangsparameter des Modells, um den Lösungsraum zu reduzieren, und dient dabei zur Identifikation einer möglichen Initillösung. Die zweite Phase beinhaltet ein Suchverfahren, das die Initillösung verbessert (vgl. [AvAk96]). Über die Intensität des Rechenaufwands wird keine Rückmeldung gegeben, und eine Einbettung in Form einer Softwarelösung ist nicht weiter behandelt worden. Des Weiteren wird hierbei kein direkter Bezug zu den Werkzeugwechselbefehlen aus dem NC-Programm genommen.

Eine optimale Indexpositionierung für Werkzeugmagazine und die automatische Werkzeugwechselvorrichtung sind von *Dereli* und *Filiz* (vgl. [DeFi00]) durch Anwendung des genetischen Algorithmus (GA) gezeigt. Als Fitnessfunktion dient hier die gesamte Werk-

⁸⁸ Der in der Literatur verwendete Begriff *Optimierung* wird inflationär genutzt, und es findet hier lediglich eine Verbesserung statt, die synonym mit dem Begriff *Optimierung* gehalten wird. Diese Termini-Verwendung ist streng genommen nicht korrekt.

zeugindexierungszeit, sodass deutlich wird, dass das Positionierungsproblem von Werkzeugen in Magazinen durch die Nutzung von Metaheuristiken lösbar ist. Der gezeigte Ansatz kann als eigenständiges System genutzt werden, wurde aber auch in ein Prozessplanungssystem (OPPS-PRI⁸⁹) eingebettet, das auf CAD/CAM-Daten zurückgreift (vgl. [DeFi00]). Damit ist zwar der produktbezogene Datenzugriff gewährleistet, und ggf. kann der Werkzeugeingriff dem Produktmodell zugeordnet werden. In dem vorgestellten Ansatz werden keine Prozesszeiten für das Rüsten des Magazins oder etwaige Fertigungsabbrüche berücksichtigt. Fertigungsabbrüche können in dem Kontext entstehen, sollte die Anzahl der erforderlichen Werkzeuge die Werkzeugmagazinkapazität überschreiten. Eine finale Startbelegung des Werkzeugmagazins wird ebenfalls nicht generiert.

Stecke (vgl. [Ste83]) identifiziert fünf Probleme aus Produktionsplanersicht für flexible Fertigungssysteme (engl. *Flexible Manufacturing Systems*, FMS). Der fünfte Punkt betrifft die Verteilung der Fertigungsoperationen und die dafür notwendigen Werkzeuge für die ausgewählten Teile zwischen den verfügbaren Maschinengruppen („*the allocation of operations and required tooling for the selected parts among the machining groups*“) (vgl. dazu [AMR92]). Dies geht also mit einer Auswahl und einem Managementsystem von Werkzeugen für die Maschinen einher, wodurch ein Werkzeugmanagementsystem als Forschungsgegenstand angesprochen wird. Die Werkzeugallokationen werden von *Amoako-Gyampah, Meredith* et al. (vgl. [AMR92]) wie folgt beschrieben: Die Strategie bestand aus einem sequenziellen Abarbeitungsprozess (*periodic batching procedure*), was in dem Beitrag als *bulk exchange* bezeichnet wird (vgl. [AMR92]). Hierbei ist zu Beginn der Planungsperiode eine Kopie jedes erforderlichen Werkzeugs bereitgestellt, welches jedem Auftrag der Teileproduktion auf den jeweiligen Maschinen innerhalb des Produktionsfensters zugeordnet wird (vgl. [AMR92]). Am Ende des Zeitfensters werden alle zugeordneten Werkzeuge aus der Maschine entnommen, und die Zuordnung der Werkzeuge für nachfolgende Produkte auf dieser Maschine folgt (vgl. [AMR92]). Damit betreffen diese Ansätze nur die Zuordnung der Werkzeuge für jeden Auftrag und jede Maschine, jedoch keine Zuordnung der Werkzeuge auf die Magazinplätze innerhalb der Maschine. In *Amoako-Gyampah, Meredith* et al. (vgl. [AMR92]) wurden bzgl. der Werkzeugallokation, neben *bulk exchange*, die Regeln *tool migration* (Werkzeugmigration), *resident tooling* und *tool sharing* angewendet (vgl. [AMR92] und auch [VUB92]). Die *bulk exchange*-Strategie errechnet den Bedarf der Werkzeuge für eine Periode (vgl. [Tan94]). Die Regel *resident tooling* beschreibt die Werkzeuge, die permanent in einem Magazin einer Maschine verbleiben (vgl. [Mit98], S. 15-37), und *tool sharing* bezeichnet die Regel, dass die Werkzeuge zwischen mehreren Maschinen und Fertigungszentren ausgetauscht und eingesetzt werden können (vgl. [AITa01]).

Einen weiteren Beitrag, der das Werkzeugmanagement thematisiert, ist von *Gray* et al. und setzt sich kritisch mit mehreren Werkzeugmanagementmethoden auseinander [GSS93]. Dabei wird ein *Framework* vorgestellt, das der Ressourcenplanung dient. Hierbei werden werkzeugspezifische Gegebenheiten berücksichtigt, wie z. B. Parameter von

⁸⁹ ⁸⁹ OPPS-PRI steht für **O**ptimised **P**rocess **P**lanning System for **P**RIsmatic parts (vgl. [DeBa05])

Fertigungsoperationen oder die Lebensdauer der Werkzeuge. Zu beachten ist jedoch, dass die Lebensdauer der Werkzeuge nicht mit Standzeit der Werkzeuge verwechselt werden darf, wie das bei *Gray et al.* den Anschein hat (vgl. [GSS93])⁹⁰, bzw. keiner konkreten Definition unterliegt. Auch der Beitrag von *Kouvelis* formuliert einen Werkzeugauswahl-Ansatz für ein Fertigungssystem nach Werkzeugbedarf innerhalb eines Planungshorizonts (vgl. [Kou91]). Hierzu erfolgt eine zwei-phasige Modellformulierung durch ein MIP⁹¹ und LP⁹² (für ein initialisiertes flexibles Fertigungssystem) (vgl. [Kou91]). Eine Werkzeugauswahl in direkter Abhängigkeit der Maschinenoperation⁹³ wird als Spezialfall erwähnt (vgl. [Kou91]). Insgesamt erfolgt keine weitere Bezugnahme auf die Werkzeugverwaltung ausgehend von NC-Programm-Befehlen.

Der Beitrag von *Bard* behandelt für N Aufträge auf einer Maschine mit der Annahme, dass die erforderliche Werkzeuganzahl die Magazinkapazität überschreitet sowie die Wechsel- und Prozesszeiten unabhängig sind, ein Verfahren, das auf die Minimierung der Gesamtwerkzeugwechsel über alle N Aufträge abzielt. Das Problem wurde hierbei als nicht-lineares ganzzahliges Modell formuliert und mittels heuristischer Verfahren gelöst, sodass lokale brauchbare Lösungen identifiziert wurden (vgl. [Bar88]).

Zudem wurde hier für das *large-scale-integer-Problem* eine *Lagrangian relaxation*, gekoppelt mit *Branche-and-Bound-Verfahren*, als effektive Methode für verwandte Probleme empfohlen (*scheduling problems, vehicle routing, Fabriklayout-Planung*) (vgl. [Bar88]). Als Vergleich sind ein MIP-formulierter Ansatz sowie ein LP-Ansatz für ein Werkzeugauswahlverfahren von [Kou91] gezeigt.

LP und MIP

Die Literatur im Bereich von TMS zeigt, dass insb. zur Problematik der Werkzeugzuordnung zu Fertigungszentren bereits Optimierungsmodelle Bestand haben, die z. B. als lineares Programm (LP) brauchbare Lösungen bieten. LPs haben in der heutigen Zeit den Vorteil, dass es „Standardsoftware“ zur Lösung gibt, und „bis auf wenige Ausnahmen können mit heutigen Optimierungstechnologien alle praxisrelevanten linearen Optimierungsmodelle in vertretbarer Zeit optimal gelöst werden“ (vgl. [MeSu09] und [SuMe13]). Dies trifft allerdings nicht für ganzzahlige, gemischt-ganzzahlige oder nicht-lineare Modelle zu (vgl. [MeSu09]). Die gemischt-ganzzahligen Optimierungsmodelle (MIP) werden als „harte“ Probleme bezeichnet, da dazu keine polynomiellen Algorithmen bekannt sind bzw. hierbei ein „schwieriger“ kombinatorischer Charakter enthalten ist (vgl.

⁹⁰ Standzeit und Lebensdauer (Dauerfestigkeit u. Ä.) als Termini werden häufig inflationär genutzt, sind aber streng zu trennen.

⁹¹ **MIP** steht für **Mixed Integer Program** und bezeichnet die gemischt-ganzzahligen Programme/Optimierung.

⁹² **LP** steht für **Lineares Programm** und ist im Kontext der linearen Optimierung angesiedelt.

⁹³ Die Maschinenoperation kommt in diesem Kontext einer Operation, ausgelöst durch ein NC-Programm oder einen Einzelbefehl aus einem NC-Programm, nah.

[MeSu09]). Hierbei eignen sich die Methoden *Backtracking*, *Branche-and-Bound*-Verfahren oder die *dynamische Programmierung* (vgl. [MeSu09]). Auch kommt der Einsatz von Metaheuristiken zum Tragen.

Tang und *Denardo* (vgl. [TaDe88a]) thematisieren die Minimierung der Werkzeugwechsel als *tool-replacement-problem* zwischen Werkzeugmagazin und der „Welt außerhalb der Werkzeugmaschine“ – einer Lagereinheit oder Ablage – bei N Aufträgen. Hier wird erwähnt, dass die Anzahl der Operationen pro Bauteil nicht die Anzahl der unterschiedlichen Werkzeuge überschreitet (da das Werkstück dann nicht produzierbar wäre). Der Werkzeugwechsel bezeichnet hierbei den Fall, dass die Werkzeuge, die benötigt werden und nicht im Werkzeugmagazin sind, eingewechselt werden. Zeiten zur Werkzeugentnahme sowie Magazinbestückung aller Werkzeuge werden als konstant definiert. Das Modell wird als *job-scheduling-problem* und als *job-grouping-problem* formuliert, und als Lösungsverfahren wird auf heuristische Verfahren und das *Branche-and-Bound*-Verfahren zurückgegriffen (vgl. [TaDe88a] und [TaDe88b]), wie diese auch zur Lösung von MIP herhalten.

Eine umfangreiche Studie zur Fertigungsplanung mit Werkzeugwechsel unter weiteren Tests der heuristischen Algorithmen *Shortest-Processing-Time-(SPT)-Rule*, *First-Fit-Decreasing-(FFD)-Rule*, *Modified-First-Fit-Decreasing-(MFFD)-Rule*, *Expected-Gain-Index-(EGI)-Rule*, *Knapsack-Heuristik*, *Two-Bin-Heuristik* und *genetischer Algorithmus (GA) mit Problem-Space-Search (GAPS)* wird von *Akturk* et. al durchgeführt. Hieraus geht hervor, dass die Berücksichtigung der Werkzeugwechsel⁹⁴ in der Fertigungsplanung als nicht selbstverständlich gegeben angenommen werden kann. Es wird zudem angemerkt, dass der Werkzeugwechsel in der Praxis durch den Verschleiß notwendig wird. Zur Lösung der Werkzeugwechsel wird ein MIP⁹⁵ aufgestellt (vgl. [AGG03]). Eine weitere Studie, bei der ein MIP aufgestellt wurde, die jedoch die Werkzeugverteilung zwischen flexiblen Fertigungssystemen betrachtet, ist in [BiAz06] adressiert. Die Lösung erfolgt über Relaxation und heuristische Methoden.

Zur Reduzierung von Produktionsgesamtkosten wird in [Akt10] eine simultane Bestimmung der optimalen Bearbeitungsbedingungen sowie der optimalen Werkzeugpositionierung für CNC-Maschinen vorgestellt. Hierbei wird angedeutet, dass durch die TMS keine direkte Verbindung zur reinen Magazinbestückung bzw. Werkzeugpositionierung sowie den Bearbeitungszuständen auf der jeweiligen Maschine besteht. Auch das Problem der Werkzeugverfügbarkeit und des Werkzeugverschleißes wird ignoriert, sodass ein Um-

⁹⁴ Hierbei ist der Werkzeugwechsel vom Magazin in die Lagereinheit außerhalb der Maschine gemeint, bspw. wenn ein Werkzeug die Standzeit übersteigt oder ein Schaden auftritt und dieses Werkzeug dann dem Magazin entnommen wird. Der Werkzeugwechsel während der Fertigung zwischen den Fertigungsoperationen auf Basis des NC-Programms wird nicht behandelt.

⁹⁵ Die Lösung erfolgt für 20 Werkzeuge. Die Zeitrestriktion zur Berechnung mithilfe des *CPLEX MIP-Solvers* beträgt 3600 s.

denken notwendig ist. Der Ansatz in [Akt10] zeigt hierzu eine Lösung des Entscheidungsproblems der Werkzeugpositionierung unter Vermeidung unzulässiger Lösungen. Grundlage ist hierbei ein mathematisches Modell⁹⁶ (vgl. [Akt10]).

Bei Betrachtung des Stands der Technik bzgl. der Werkzeugallokation wird deutlich, dass insb. die Werkzeugmanagementsysteme bzw. die Werkzeugauswahlplanung und -zuordnung zu Fertigungssystemen in den frühen 1990er Jahren eine herausfordernde Thematik im Bereich CIM darstellen (vgl. [VUB92], [Kou91], [GSS93]).

Fokussiert auf das Werkzeugmagazin, wird ein softwarebasierter Ansatz gezeigt, bei dem die „optimale“ Position des Schneidwerkzeugs innerhalb eines automatischen Werkzeugwechslers mit rotierendem Werkzeugmagazin bestimmt wird. Hierbei wird der genetische Algorithmus verwendet, der als Eingangsgröße die Zuordnungsliste enthält. Die Zuordnungsliste dient hierbei der Zuordnung des Werkzeugs zu dem Bearbeitungsschritt. Weitere Eingangsgrößen für den Algorithmus sind die Anzahl freier Magazinplätze und ein Indexierungszeitwert. Dabei gilt: Eine kürzere Indexierungszeit bedeutet eine bessere Fitness für die Ermittlung der „optimalen“ Lösung. Dieser Ansatz kann als Einzellösung stehen oder in Anlehnung an das Prozessplanungsmodul OPPS-PRI verwendet werden (vgl. [DeFi00]). Nur über diese Modulanbindung wird der Zusammenhang zu weiteren bauteilrelevanten Informationen, wie z. B. die Anzahl der Werkzeugwechsel oder dem NC-Programm, hergestellt. Ansonsten gibt es keine direkte Verbindung zu weiteren Modulen wie z. B. das NC-Programm als Vorgaben für die Werkzeugwechsel.

Unter Nutzung der Metaheuristik *Simulated Annealing* (SA) werden das sog. Indexierungsproblem bei Werkzeugwechselprozessen sowie das Werkzeugwechselproblem als solches bearbeitet. Das Werkzeugwechselproblem (bei umfangreicher Konfiguration und Magazingröße) wird in dem Beitrag von [BaOz16] als komplexes Problem bezeichnet, sodass der Einsatz einer Heuristik damit begründet ist. Die beiden genannten Probleme wurden bislang separat gelöst. Der Beitrag von [BaOz16] zeigt einen Ansatz, wie beide Probleme durch eine Erweiterung der Heuristik simultan gelöst werden können. Hierbei wurden auch Werkzeugduplikate berücksichtigt. Der Ansatz besteht bislang ebenfalls als Einzellösungsansatz, es wird aber erwähnt, dass eine Anbindung an ein CAPP⁹⁷-System denkbar ist (vgl. [BaOz16]). Eine Anbindung an NC-Programme oder weitere fertigungstechnische Randbedingungen werden nicht explizit herangezogen. Vielmehr handelt es sich um eine Studie zur Bereitstellung der Lösung durch die Erweiterung des SA-Algorithmus.

Der Beitrag von *Baykasoğlu* und *Ozsoydan* befasst sich mit dem Indexierungsproblem eines automatischen Werkzeugwechslers, bei dem verschiedene Werkzeuge innerhalb eines Magazins optimal zugeordnet werden. Dabei ist das Ziel, die Zeit zu minimieren, die der Werkzeugwechsler für die Indexierung der Plätze und Zuordnung der Werkzeuge benötigt. Die Komplexität des Problems nimmt mit einer mehrfachen Positionierung von

⁹⁶ Eine optimale Lösung wurde u. a. mittels *CPLEX MIP-Solver* gefunden.

⁹⁷ CAPP steht für **C**omputer **A**ided **P**rocess **P**lanning.

Werkzeugen (Duplikaten) sowie bidirektionalen Bewegung des Magazins zu. Zur Lösung des Indexierungsproblems werden der Algorithmus SASP (*shortest path algorithm*) und die Metaheuristiken *Simulated Annealing* und *Neighborhood Search* vorgeschlagen (vgl. [BaOz15]). Der Einsatz der Metaheuristik *tabu search* zur Handhabung des Werkzeugindexproblems wird in dem Beitrag [Gho16-ol] und der GA für das Indexproblem in [Gho16a-ol] behandelt. Hierdurch wird vermehrt deutlich, dass zur Lösung dieses Problems diverse Metaheuristiken herangezogen werden können, wenn auch die Gefahr besteht, keine optimale Lösung zu erhalten.

Eine weitere Heuristik für die Werkzeugauswahl innerhalb von flexiblen Fertigungssystemen wird in [BSK04] vorgestellt. Hierbei wird als Kriterium für die Werkzeugauswahl und -positionierung das Verhältnis von Werkzeuglebensdauer zu Werkzeuggröße gewählt, sodass die Werkzeugmagazinkapazität effizient ausgenutzt werden kann. Insgesamt sind kürzere Durchlaufzeiten zu verzeichnen, da weniger Werkzeugwechsel erfolgen. Validiert wird dieser Ansatz anhand einer Simulation (vgl. [BSK04]). Die kürzere Durchlaufzeit kann damit zusammenhängen, dass durch die Werkzeuggröße und Lebensdauer eine geringere Auslastung des Magazins stattfinden könnte, wodurch sich die Fertigung nicht unbedingt verkürzt. Auch können dadurch vermehrt Neu-Positionierungen bei Fertigungsunterbrechung auftreten. Hierbei muss beachtet werden, dass Werkzeuglebensdauer im Allgemeinen nicht die Standzeit eines Werkzeugs meint. Aus technischer Sicht ist aber die Standzeit für die praktische Anwendung präferiert zu berücksichtigen.

3.2.2 Werkzeugmagazin und Werkzeugwechselkonzepte

Die Art des Werkzeugmagazins mit beweglichen Werkzeugplätzen wird nach *Weck* und *Brecher* (vgl. [WeBr05] S. 462) unter der Klassifizierung bzgl. der Lage der Werkzeuge, Bezug nehmend auf die Rotationsachse, der Anzahl der Bewegungsachsen und der Anzahl der Werkzeugebenen unterschieden. Dabei liegen in einem Ketten- und Scheibenmagazin die Werkzeuge axial zur Rotationsachse und besitzen nur eine Werkzeugebene. Das Kettenmagazin besitzt im Vergleich zum Scheibenmagazin mehr als eine Bewegungsachse. Die Span-zu-Span-Zeiten bzw. Wechselzeiten hängen individuell von der Maschine selbst, d. h. dem konstruktiven Aufbau, der Antriebsleistung der Werkzeugwechselvorrichtung und der Peripheriegeräte ab. Die Grundfunktionen der Magazine bleiben jedoch identisch.

Die Werkzeugwechselvorrichtung ist häufig durch einen auf einer Welle gelagerten Greifarm konzipiert und entnimmt Werkzeuge aus der Arbeitsspindel und dem Magazin gleichzeitig, führt eine Rotationsbewegung um 180° aus und tauscht auf diese Weise die Werkzeuge aus. Gerade vor dem Hintergrund, sichere Wechselvorrichtungen zu entwickeln, die im industriellen Kontext die Werkzeugmaschinen für Kunden attraktiver gestalten sollen, gibt es deutliche Entwicklungsanstrengungen, die in Patentschriften mün-

den, wie z. B. von *Miksch*⁹⁸ und *Popp*⁹⁹ (vgl. [Mik03a], [Mik03b], [Pop01]). Die Wechsellvorrichtungen sind aus Funktionssicht „Werkzeuge wechseln“ miteinander vergleichbar.

Werkzeugmagazin mit losen Werkzeugplätzen

Für eine effektive Verbesserung der Rüst- und Nebenzeiten verhalten sich Wechseleinrichtungen moderner Werkzeugmaschinen u. a. wie folgt: Während der Fertigung mit einem eingewechselten Werkzeug wird die Drehposition des Magazins so ausgerichtet, dass das nachfolgende Werkzeug in die Nähe bzw. unmittelbare Nachbarschaft oder exakt auf den Werkzeugwechsellpunkt gefahren wird.¹⁰⁰ Das impliziert, dass die Werkzeugplätze, die für den Maschinenbediener durchnummeriert sind, innerhalb der Maschinensteuerung in Listenform o. Ä. den jeweiligen Werkzeugnummern aus dem NC-Programm zugeordnet werden. Bei einem Werkzeugwechsel wird das neue Werkzeug aus dem Magazin entnommen und gleichzeitig das vorherige Werkzeug an den freien Platz zurückgelegt. Abschließend erfolgt eine Aktualisierung der Listenzuordnung (steuerungsbedingt).

Werkzeugmagazin mit festen Werkzeugplätzen

Die fest definierten Werkzeugplätze beinhalten eine festprogrammierte Werkzeugzuordnung zu den jeweiligen Magazinplätzen:¹⁰¹ Hierbei wird jedes Werkzeug beim Werkzeugwechsel an den vorgesehenen Platz zurückgelegt, danach wird das nachfolgend nutzbare Werkzeug an die Werkzeugwechselposition gefahren, um den Wechsel anschließend zu vollziehen. Diese sukzessiv ablaufenden Prozesse führen meist zu einer relativ hohen Span-zu-Span-Zeit, weswegen dies im Zuge der Neuentwicklungen vermieden wird, indem auf die Ausstattung mit dem Doppelgreifer¹⁰² und der entsprechenden Magazinfunktionalität zurückgegriffen wird. Dadurch sind keine festprogrammierten Werkzeugplätze notwendig. Je nach Bedarf und Gestaltung der Auswahlmethode der Werkzeuge als Bestandteil eines Planungswerkzeugs muss die Wechselmethode maschinenspezifisch angepasst werden, da sich abhängig von der Art des Werkzeugmagazins unterschiedliche Wechselprozesse und Wechselzeiten ergeben.

⁹⁸ Die Patentschriften von *Miksch* (Erfinder) weisen als Patentinhaber die *Miksch GmbH*, Göppingen in Deutschland, vor.

⁹⁹ Die Patentschriften von *Popp* (Erfinder) weisen als Patentinhaber die *EMAG Maschinenfabrik GmbH*, Salach in Deutschland, vor.

¹⁰⁰ Bei Betrachtung heutiger Werkzeugmaschinen ist feststellbar, dass z. B. das nachfolgend benötigte Werkzeug bereits vor dem eigentlichen Werkzeugwechsel durch die Rotationsbewegung des Magazins auf die Werkzeugwechselposition gefahren wird (vgl. Werkzeugmaschinen der Firma DMG Mori AG, Bielefeld oder *EMCO GmbH*, Hallein in Österreich).

¹⁰¹ Bei neuartigen Maschinen unüblich, jedoch nicht auszuschließen.

¹⁰² Mehrfachgreifer sind ebenfalls denkbar.

3.2.3 Standzeitüberwachung von Werkzeugen

In der praktischen Anwendung ist zur Vermeidung von Ausschuss, Beschädigungen und zum Schutz der Maschine ein Werkzeugüberwachungssystem vorzufinden. Die Überwachung beinhaltet die Möglichkeit der Standzeitüberwachung und die damit verbundene Verschleißüberwachung bzw. Bruchüberwachung. Die Überwachung dient dem einzigen Zweck, verschlissene oder defekte Werkzeuge durch „Schwesternwerkzeuge“ zu ersetzen. Die notwendigen steuerungsinternen Daten sind schematisch nach *Indramat* (vgl. [WeBr06], [Rex02-ol]) in Grunddaten und Schneidendaten unterteilt und in Abbildung 3 gezeigt [WeBr06]¹⁰³.

Die Standzeit hängt von Parametern wie z. B. der Schnittgeschwindigkeit ab sowie von geometrischen Gegebenheiten des Werkzeugs, der Schneidstoffe und Schneidkanten. Für die Optimierung der Auswahl von Werkzeuggeometrien haben *Duran* und *Consalter* [DuCo09] den Versuch unternommen, optimale Werkzeuggeometrien für die Werkzeugauswahl mithilfe der Metaheuristik *Partikelschwarmoptimierung* zu identifizieren. Das Ziel hierbei ist u. a. die Arbeit mit Werkzeughandbüchern oder -katalogen zu verringern, womit Planer und Werker die Werkzeugauswahl anhand geometrischer Daten durchführen. Hierbei wurde festgestellt, dass eine Auswahl geeigneter Werkzeuge und der dafür vorgesehenen Werkzeug- und Schneidgeometrien in realer Werkstattumgebung möglich ist, sodass der Ansatz dazu beiträgt, Suchverfahren mittels Handbüchern zu verringern (vgl. [DuCo09]).

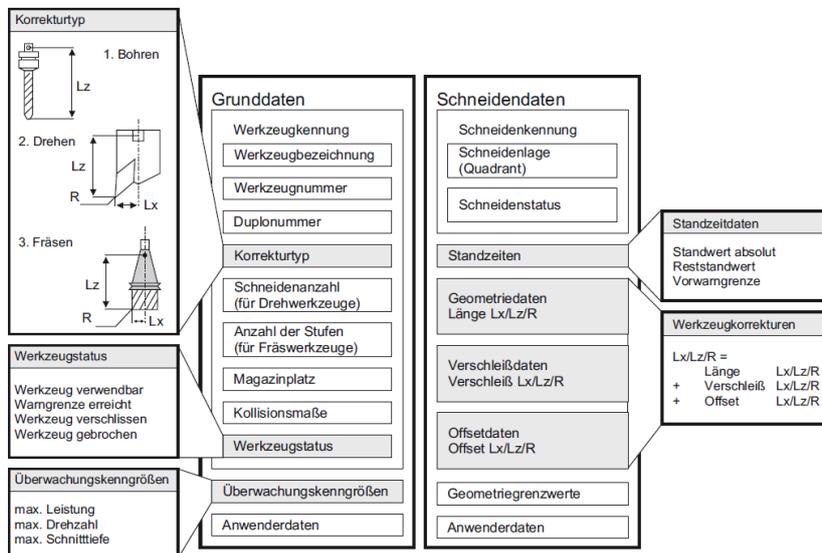


Abbildung 3: Steuerungsinterne Daten für die Werkzeugverwaltung nach Indramat aus Weck und Brecher (vgl. [WeBr06] S. 179)

¹⁰³ Die Quellenangabe bezieht sich auf Inhalte der *Indramat GmbH*, die 1965/66 durch Rexroth akquiriert wurde, aus der u. a. die Rexroth AG resultierte. Heute sind betriebliche Elemente unter dem Dach der *Bosch Rexroth AG* wiederzufinden.

Für eine erfolgreiche Überwachung von Standzeiten sind allgemein die absoluten Standzeiten von Werkzeugen, die Reststandzeiten sowie eine definierte Vorwarngrenze notwendig. Ein Werkzeug ist hierbei so lange „arbeitsfähig“ bis eine bestimmte Verschleißgröße erreicht ist. Beim Bohren und Fräsen wird in diesem Kontext auch von der Standlänge¹⁰⁴ L gesprochen (vgl. [DiTs14]). Beide Begriffspaare sind aus Sicht des Informationsgewinns gleichbedeutend (vgl. [DiTs14]). Aus Gründen der Vereinfachung wird im Laufe der Arbeit daher immer von Standzeit gesprochen.

Nach *Dietrich* und *Tschätsch* [DiTs14] sind wichtige Faktoren, die die Standzeit beeinflussen, der Werkstückwerkstoff, der Schneidstoff und die Schneidform, die Oberfläche von Werkzeugen und Werkstücken, die Steifigkeit, der Spanungsquerschnitt, das Kühlschmiermittel und die Schnittgeschwindigkeit. Ferner beeinflussen der eingestellte Spindelvorschub f und die Schnitttiefe (a_p) ebenfalls die Standzeit, deren Produkt den Spanungsquerschnitt $A = f * a_p$ ergibt. Die Schnittgeschwindigkeit v_c hat den größten Einfluss auf die Standzeit T , deren Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit auch in sog. Standzeitkurven dargestellt ist. Die Gleichung, mit der die Standzeit rechnerisch bestimmt werden kann, ist die Taylor-Gleichung ($f(v_c-)$):

$$T = \frac{1}{C^\kappa} * v_c^\kappa \quad (3.1)$$

C in [m/min] ist die Schnittgeschwindigkeit für $T = 1$ min, und κ ist eine Konstante. Die zugehörige Kurve lässt folgern, dass die Standzeit mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit exponentiell abfällt. Der qualitative Kurvenverlauf der Standzeit ist in Abbildung 4 dargestellt.

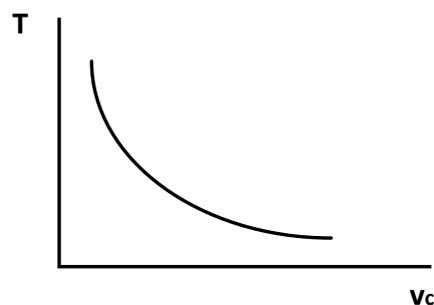


Abbildung 4: Standzeit T in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit (vgl. [DiTs14])

Durch die logarithmische Darstellung der Achsen ergibt sich die T - v_c -Gerade aus der oben genannten Funktion, die in Abbildung 5 schematisch dargestellt wird.

¹⁰⁴ Damit ist streng genommen die Anzahl der Bohr- und Frästiefen gemeint, die mit einem Werkzeug erreicht werden, bevor die bestimmte Verschleißgröße überschritten wird.

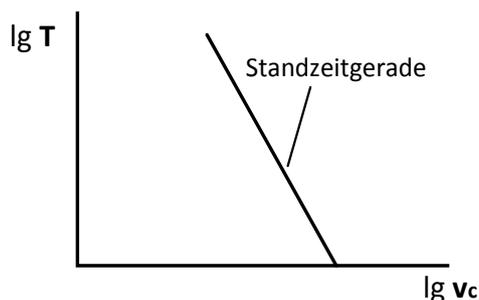


Abbildung 5: Logarithmische Darstellung der Taylor-Gleichung (vgl. [DiTs14])

Mit Berücksichtigung des Spanungsquerschnitts $A = f * a_p$ sowie der spezifischen Schnittgeschwindigkeit v_{c111} (definiert für $f = 1 \text{ mm/U}$, $a_p = 1 \text{ mm}$ und $T = 1 \text{ min}$) und der Exponenten E , F und G ergibt sich die erweiterte Taylor-Gleichung:

$$v_c = v_{c111} * f^E * a_p^F * T^G \quad (3.2)$$

Für den Parameter v_{c111} bzw. die Exponenten E , F und G wird die geprüfte Herstellerangabe für das jeweilige Werkzeug angegeben, wobei hier $G = \frac{1}{\kappa}$ gilt.

Die Ermittlung der Standzeiten für die jeweilige Konfiguration von v_c wird in der Praxis durch Tabellenwerke oder Datenbankabrufe bzw. Herstellerangaben übernommen, was bei manueller exakter Berechnung allerdings zu einem hohen Aufwand führt. Insbesondere wenn v_c variiert bzw. die Bauteilgeometrie komplex ist oder ggf. die Werkstoffe im Zuge der Fertigung variiert werden, ist eine genaue Berechnung zunehmend erschwert. Insbesondere die Verwendung von mehreren Werkzeugen unterschiedlicher Art und Funktion macht die exakte Vorhersage der Standzeit unmöglich, sodass hier vereinfachte Grundannahmen (Modellannahmen) getroffen werden (vgl. [DiTs14] S. 27). Häufig wird der Wechsel zwischen verschiedenen Standzeiten (Standzeitniveaus) und zugehörigen Schnittparametern durch Umrechnungsfaktoren ermöglicht. Die Grundannahmen für allgemeine Standzeiten wurden nach verschiedenen Anlagentypen unterschieden, die bspw. vereinzelt in Tabelle 6 aufgeführt sind.

Tabelle 6: Klassifizierung von Standzeiten nach Maschinen und Rüstzeit (vgl. [DiTs14])

<i>Produktionsmaschinen mit geringer Rüstzeit, z. B. numerisch gesteuerte Maschinen</i>	$T = 15 \text{ bis } 30 \text{ min}$
<i>Maschinen mit mittlerer Rüstzeit ohne Verkettung, wie z. B. Revolverdrehmaschinen mit Nockensteuerung</i>	$T = 60 \text{ min}$
<i>Maschinen mit aufwendigem Rüstprozess bzw. hoher resultierender Rüstzeit ohne Verkettung (z. B. kurvengesteuerte Drehautomaten) und verkettete Sondermaschinen (z. B. Transferstraßen)</i>	$T = 240 \text{ min}$

Die Wahl der Werte für T und die daraus resultierende Parameterkonfiguration für v_c ergeben sich hierbei voraussichtlich aus der Überlegung: In Abhängigkeit eines ansteigenden Komplexitätsgrades eines Rüstvorgangs bzgl. der Bestückung der Maschine mit Werkzeugen sollen die Werkzeugentnahmen nach Ablauf von T für Wartungsprozesse o. Ä. in längeren Zeitintervallen erfolgen bzw. an günstige Zeitpunkte verschoben werden. Das heißt, dass die festgesetzte Zeit T so gewählt wird, dass im laufenden Schichtbetrieb, in dem das Werkzeug im Einsatz ist, T als Gesamt-Einsatzzeit des Werkzeugs nicht erreicht wird bzw. nur vereinzelt und selten erreicht werden soll. Ansonsten kann der ungünstige Fall auftreten, dass zu Schichtbeginn oder innerhalb einer Schicht die Werkzeuge ausgetauscht werden müssen und es damit zu Fertigungsunterbrechungen (oder Verzögerungen) kommt. Das Einhalten von Terminen wird folglich erschwert, sodass die Standzeit eine vermehrte Beachtung in der Planung finden soll. In der realen Fertigung und aus Tabelle 6 ableitbar, werden Arbeitsschichten in der Regel länger andauern als die Standzeiten bestimmter Werkzeuge. Dies führt dazu, dass kritische Werkzeuge, d. h. häufig verwendete Werkzeuge, nach jeder Schicht oder einer bestimmten Anzahl an Arbeitsschritten ersetzt werden, sodass die Schneiden nachbearbeitet werden können. Auch können innerhalb der Schicht feste Werkzeugwartungsintervalle definiert werden, sodass alle kritischen Werkzeuge ausgewechselt und nachbearbeitet werden.

Um dies zu gewährleisten, werden theoretische Überlegungen daran angeknüpft, dass die Parameter der Maschine in Abhängigkeit von der vollen Leistungsausnutzung der jeweiligen Maschine und dem Spannungsquerschnitt gewählt werden. Dazu wird der Schnittpunkt zwischen Werkzeug-Geraden und Maschinen-Geraden berechnet. Die Werkzeug-Gerade wird mithilfe von Angaben aus Tabellenwerken als Funktion einer konstanten Standzeit T gebildet und gibt die Schnittgeschwindigkeit in Abhängigkeit eines Spannungsquerschnitts an:

$$\log v_c = f(\log A) \text{ für } T = \text{const.}$$

Die nachfolgende Abbildung 6 verdeutlicht exemplarisch die Werkzeuggerade (vgl. [DiTs14] S. 28).

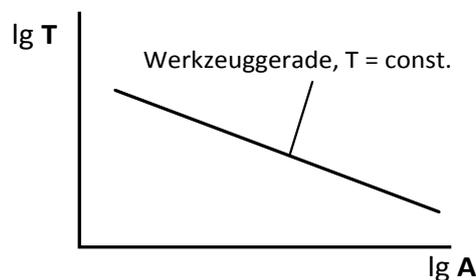


Abbildung 6: Werkzeug-Gerade bei einer Standzeit von T

Unter Berücksichtigung der Antriebsleistung der zugrunde liegenden Werkzeugmaschine kann äquivalent eine Maschinen-Gerade erstellt werden:

$$\log v_c = f(\log A) \text{ für } P = \text{const.}$$

Die Abbildung 7 stellt äquivalent zu Abbildung 6 die Werkzeugmaschinen-Gerade in logarithmisch skalierten Achsen dar (vgl. [DiTs14] S. 30).

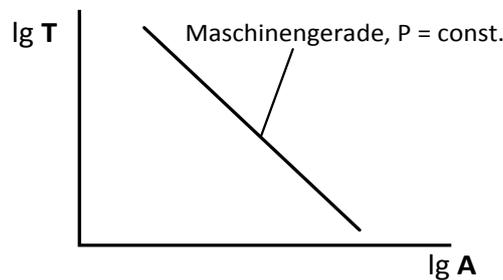


Abbildung 7: Maschinen-Gerade bei konstanter Antriebsleistung P

Für das Erstellen der Maschinen-Geraden ist neben der gegebenen Leistung der Wirkungsgrad η_M relevant. Die Angaben von Wirkungsgrad und Leistung sind in der Regel Maschinenherstellerangaben. Aus Tabellenwerken – insb. in Abhängigkeit des zu zerspannenden Werkstoffs – können zusätzlich Größen ermittelt werden wie die spezifische Schnittkraft k_c , sodass sich für die Leistungsgleichung Folgendes ergibt:

$$P = \frac{a_p * f * k_c * v_c}{60 \text{ s/min} * 10^3 \text{ W/kW} * \eta_M} \quad (3.3)$$

Die Maschinen-Gerade gewährleistet als Orientierungsgröße, dass die Antriebsleistung der Maschine bei dem zugrunde liegenden Fertigungsprozess adäquat ausgenutzt wird. Eine Überbeanspruchung der Maschine ist hierbei zu vermeiden (Bereich oberhalb der Maschinen-Geraden). In den unteren Bereichen der Geraden wird die Antriebsleistung nicht ausgenutzt, womit Ressourcen verschwendet werden. Die Maschine selbst wird dabei nicht unbedingt überlastet bzw. beschädigt (vgl. [DiTs14] S. 29).

Der optimal einzustellende Arbeitsbereich ergibt sich durch den Schnittpunkt der Werkzeug- und Maschinen-Geraden, was exemplarisch in Abbildung 8 qualitativ gezeigt wird. Hierbei wird von einer vollständigen Ausnutzung der Standzeit gesprochen sowie von vollständiger Ausnutzung der Maschinenleistung. Die Abbildung 8 zeigt den optimalen Arbeitsbereich grafisch in ebenfalls logarithmisch skalierten Achsen (vgl. [DiTs14] S. 31). Problematisch hierbei ist, dass diese Gerade nur für ein Werkzeug und eine Maschine gilt und nur ein Prozessfenster (Arbeitsbereich) möglich ist, sodass bei einer anderen notwendigen Konfiguration der Schnittparameter kein optimaler Arbeitsbereich Bestand hat – z. B. für die Prozesse *Schruppen* oder *Schlichten* im Vergleich mit dem eigentlichen Optimum. Prinzipiell ist für jede Werkzeug-Maschine-Kombination ein Geradenpaar verfügbar.

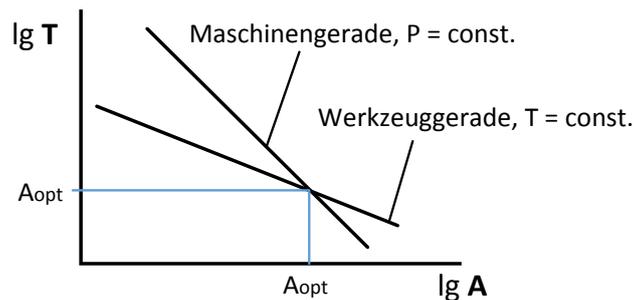


Abbildung 8: Arbeitsbereich bei Ausnutzung von Maschinenleistung und Werkzeugstandzeit (vgl. [DiTs14])

Für eine genauere Beachtung der Standzeit ist ein genaues Abbild des Werkzeugverschleißes notwendig, was wegen der gegenseitigen Abhängigkeit von Werkstoffen, Schneidstoffen, Geometrien, Bearbeitungsparametern und -dauern zu einer hohen Komplexität führt. Hierzu erfolgt der Rückgriff auf computergestützte Simulationsmodelle oder Schätzverfahren. Als Beispiel dazu zeigen *Penedo et al.* (vgl. [PHG+12]) einen iterativen modellbasierten Ansatz zur Abschätzung von Werkzeugverschleißerscheinungen mittels hybrider inkrementeller Modelle. Dabei binden die hybriden inkrementellen Modelle geringere Berechnungsressourcen, und wenige Parameter sind ausreichend, um verlässliche Aussagen über die Charakteristika des Fertigungsprozesses zu ermöglichen. Die Ergebnisse der hybriden inkrementellen Modelle sind zudem präziser als vergleichsweise transduktive und induktive *Neuro-Fuzzy-Modelle*. Der Beitrag bezieht sich hier auf Drehwerkzeuge, aber prinzipiell sind ähnliche Überlegungen auch für Bohr- und Fräswerkzeuge denkbar. (vgl. [PHG+12])

3.3 Benutzerschnittstelle

Durch verschiedene Personen wie Einrichter, Planer und Werker, die ein und dieselbe Person sein können – was jedoch in einer Organisation nicht zwangsläufig auftritt – ist für eine fehlerfreie Fertigung, ausgehend von der Arbeitsvorbereitung, eine Schnittstelle notwendig, mit der der Nutzer agieren kann. Für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung liegt die rechnergestützte Schnittstelle als Onlineschnittstelle sowie als kommerzielle Kollaborationsplattform vor.

Zu bedenken ist, dass die NC-Programmierung im hohen Maße mit der Maschinenbelegung zusammenhängen kann. Damit sind die NC-Programmanpassung, Identifikation der Werkstück- und Werkzeugpositionierung als Element der Arbeitssteuerung anzusehen, sollte eine scharfe Abgrenzung zwischen Arbeitsplanung und -steuerung eingehalten werden. Arbeitssteuerung setzt dabei immer einen konkreten Auftrag voraus. Für die Schnittstelle wird dadurch ebenfalls ein Auftrag vorausgesetzt.

Durchgängige Schnittstellenlösung

Eine durchgängige Schnittstellenlösung ermöglicht es dem Nutzer, in dem für ihn vorgesehenen Bereich sukzessiv Daten zu Aufträgen zu hinterlegen, die im Anschluss eine Werkstück- und Werkzeugpositionierung auslösen und die Daten in eine Datenbank ablegen. Zur flexiblen Nutzung wurde dazu im Forschungsprojekt *InVorMa* des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL* eine webbasierte Onlineschnittstelle vorgeschlagen. Erste Entwicklungsansätze sind dazu von *Weber* in [Web17] S. 141ff. gezeigt.

Gängige Kollaborationsplattformen: Ebenfalls denkbar als Benutzerschnittstelle zur Verwaltung und Steuerung von Werkstück- und Werkzeugpositionierungen ist eine Kollaborationsplattform. Einige Anbieter sowie bekannte kommerzielle Plattformen werden in [Mac17a-ol] aufgeführt. Im Fokus steht hierbei die Echtzeitkommunikation durch *Chat-* und *Messageservices* sowie die Möglichkeit, synchron an einem oder mehreren Dokumenten in Echtzeit (zeitgleich, parallel) mit mehreren Partnern zu arbeiten. Dabei gibt es eine Vielzahl von Visualisierungs- und Dokumentationsmethoden zur Ergebnispräsentation und Protokollierung. Ein gewisser Schnittstellenstandard sowie Kommunikationsprotokolle bestehen bereits, jedoch kann bei der Datenschnittstelle bzw. bei der Kompatibilität zwischen verschiedenen Lösungen die Entwicklung bedarfsgerechter Datenmodelle notwendig sein, die die Durchgängigkeit gewährleisten. Als Beispiel auf Datenformatebene (Datenaustausch und Datenintegration) sei hierzu auf die Schnittstelle durch das AML-Format (vgl. [ScLü15]) hingewiesen.

Eine konkrete Kollaborationsplattform wird u. a. als MSSP bereitgestellt. MSSP stand im Rahmen der Arbeit zur Verfügung, sodass eine Nutzung für die Benutzerschnittstelle in der Pilotanwendung vorgenommen werden kann. In den wesentlichen Funktionen unterscheiden sich Kollaborationsplattformen nur in der Anwendung bzgl. des Dokumentenmanagements, der Echtzeit-Kommunikation und des Informationsaustausches sowie der Anbindung von externen Inhalten. MSSP besitzt z. B. keinen Echtzeit-Chat, was jedoch durch andere Produkte von MS gestellt wird und integriert ist.¹⁰⁵

MSSP:

Die Kollaborationsplattform MSSP ermöglicht eine Zusammenarbeit an einer gemeinsamen Aufgabe (*E-Collaboration* (vgl. [FrPe08], [BGT09])) sowie das Ablegen von Dokumenten an einem zentralen Speicherort (vgl. [End16]). Eine detailliertere Einordnung von MSSP findet im Anhang A3 statt, vgl. Abbildung 87.

Als technische Anwendung bietet MSSP die Möglichkeit, die Benutzeroberfläche individuell anzupassen (vgl. [NoSp13]). Das bedeutet, dass hier das Potenzial besteht, für die Bedienung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung einzelne Verwaltungsfunktionen wie z. B. die Auftragsverwaltung und die Werkzeugverwaltung zu übernehmen und

¹⁰⁵ Für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung sind Chat- und (Video-)Konferenzfunktionen nicht zwingend notwendig. Für die Benutzerschnittstelle sind nur eine Ansteuerung externer Elemente, eine Eingabeschnittstelle für Auftragsdaten sowie eine Datenhaltungsanbindung notwendig, was durch MSSP zunächst vorliegt.

einzelne *Cockpit-Masken* bzw. Webseiten dafür individuell zu gestalten. Durch eine Entwicklungsplattform stehen dazu Webseitensammlungen zur Verfügung. Auch sind App-Entwicklungen sowie Datenanalyse-Werkzeuge verfügbar (vgl. [NoSp13]). Diese Applikationen werden als *SharePoint Web-Service* zur Verfügung gestellt, sodass Funktionsbereiche wie Suche (*Search*), Webseitensammlung (*Sites*), Metadatenmanagement (*Managed Metadata*) usw. gewährt werden (vgl. [Pia11]). Physikalisch wird die MSSP-Anwendung durch eine Server-Farm zur Verfügung gestellt. Der Aufbau von MSSP ist in Anlehnung an [Rol12-ol] in Abbildung 9 dargestellt.

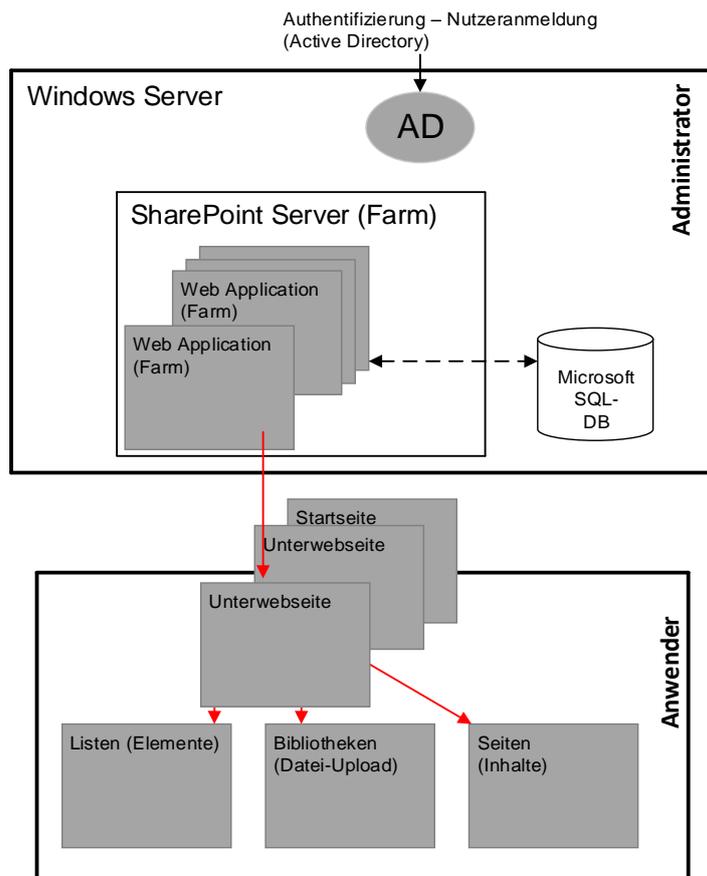


Abbildung 9: Übersicht über den Aufbau von MSSP nach [Rol12-ol]

Nach Einrichtung des *Windows-Servers* steht der *MS SharePoint-Server* zur Verfügung, der einen *MS SQL-Server* mit sich bringt, um die Datenerhaltung zu realisieren. Der *Windows-Server* bietet zudem verschiedene Möglichkeiten, die Nutzer zu authentifizieren, um somit ein Multi-Nutzer-System anzubieten. Damit wird unter der MSSP-Nutzung gewährleistet, dass verschiedene Personen sich außerhalb und auch innerhalb einer Organisation in ihren vorgesehenen Webseiten und Datenbankansichten bewegen können.

Auf dem *MS SharePoint-Server* werden verschiedene *Web-Applikationen (Web Applications)*, auch *Farm* genannt, angeboten, die sich nutzerspezifisch einrichten lassen. Jeder

Bereich einer Organisation kann seine eigene *Web-Applikation*¹⁰⁶ besitzen. Die *Web-Applikationen* beinhalten die Webseitensammlung, die wiederum aus Listen¹⁰⁷, Bibliotheken¹⁰⁸ und Seiten (Inhalte) bestehen kann.

In der MSSP-Umgebung ist zudem möglich, externe Inhalte einzubinden, was für die Werkzeug- und Werkstückpositionierung interessant ist. Hierzu dient BSC (*Business Connectivity Services*) und der Ersatz von MOS 2007 BDC (*Business Data Catalog*). Durch die BSC werden die Erstellung und Einbindung externer Inhalte geboten (vgl. [Man10]). Angelehnt an die Definition von *Business Data Models* (vgl. [Man10]) gibt es zwei Methoden, die erforderlich sind, um externe Inhalte zu generieren. Das ist damit begründet, dass die XML-basierte Datenaustauschmethode in der MSSP-Umgebung ausläuft (vgl. [Man10] S. 568). Dies ist problematisch für die Verwaltung von externen Inhalten, da diese häufig auf dem XML-Format basieren, sodass diese zwar weiterhin verwendet werden können, jedoch zusätzlichen Programmieraufwand zur Anpassung bzw. Schaffung einer Kompatibilität erfordern. Für MSSP müssen die einzelnen Entitäten und deren Instanzen definiert sein. Zwei Methoden dazu sind *Read List* und *Read Item* (vgl. [Man10]). Ferner ist eine Anbindung an eine SQL-Datenbank auch außerhalb des MS SQL-Servers möglich, und es werden über WCF¹⁰⁹-Service ebenfalls standardisierte Möglichkeiten geboten, Datenquellen einzubinden, wenn auch eingeschränkt (vgl. [Man10]). Nach [Man10] wird für die Entwicklung das Werkzeug *SharePoint Designer* empfohlen. Die BSC-Modelle können ebenfalls auch in der Sprache C# mittels der Entwicklungsumgebung *MS Visual Studios* entwickelt werden (vgl. [Man10]).

Der größte Vorteil des MSSP-Systems ist die Möglichkeit, mit mehreren Nutzern gleichzeitig an einem oder mehreren Projekten zu arbeiten. Dies ist auch bei der Ermittlung von Werkstück- und Werkzeugpositionen möglich, wenn verschiedene Aufträge unterschiedlicher Werkstücke auf unterschiedlichen Maschinen geplant sind.

¹⁰⁶ In der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Universität Paderborn wäre das z. B. die Arbeitsgruppe Wirtschaftsinformatik, insb. CIM im Department 3 der Wirtschaftsinformatik, oder das Dekanat o. Ä.

¹⁰⁷ Eine Liste dient im MSSP der Speicherung von listenrelevanten Datentypen. Das können z. B. Mediendateien, Kalender, Adressbücher, Kontaktdateien, Word- und Excel-Dokumente o. Ä. sein (vgl. [MTE+14], S. 214).

¹⁰⁸ Bei der Verwendung von MSSP werden verschiedene Bibliotheken-Typen unterschieden, die der Speicherung von HTML-Inhalten (Seitenbibliothek), dem Speichern von Objekten (Bild-, Audio- oder Videodateien in Objektbibliotheken) oder als Dokumentenbibliotheken dienen (vgl. [MTE+14], S. 214).

¹⁰⁹ WCF steht für Windows Communication Foundation und ist eine Plattform zur Aggregation der Kommunikation zwischen den einzelnen Anwendungen in MS Windows. Hierbei werden verschiedene Services unter einer einheitlichen Programmierschnittstelle zusammengefasst: „*Windows Communication Foundation (vorheriger Codename ‚Indigo‘) ist ein Satz von .NET-Technologien zum Erstellen und Ausführen vernetzter Systeme. Es handelt sich dabei um eine neue Klasse der Kommunikationsinfrastruktur, die für die Webdienstarchitektur erstellt wurde*“ (vgl. [WCF16-ol]).

4 Zu leistende Arbeit

Digitale Werkzeuge zur Planung und Verifizierung spanender Fertigungsprozesse bieten Möglichkeiten, Maschineneinrichtung und NC-Programme zu überprüfen.¹¹⁰ Die reine Überprüfung der Werkzeugpositionierung wird hierbei häufig gänzlich und die der Werkstückpositionierung zum Teil vernachlässigt. Um die Werkstück- und Werkzeugpositionierung zu gewährleisten, sind unterstützende Systeme notwendig, die über eine ortsunabhängige Schnittstelle gesteuert werden können. Zur Lösung der Problemstellung und zur Erfüllung der notwendigen Anforderungen sind Maßnahmen notwendig, die im Folgenden dargelegt werden.

4.1 Modellbasierte Werkstückpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit auf Basis realer NC-Programme

Zur Verknüpfung einer lokalen Softwarelösung (Simulation einer realen Werkzeugmaschine als virtuelle Werkzeugmaschine) mit einer Auftragssteuerung und anschließenden Identifikation einer verbesserten Werkstückposition im Arbeitsraum der Maschine wird ein zwei-phasierter Ansatz verfolgt. Der Ansatz setzt sich aus mehreren Modulen zusammen, wodurch gewährleistet werden kann, dass zum einen die Zykluszeit durch eine verbesserte Einrichtungsituation von Werkstücken im Arbeitsraum der Maschinen reduziert wird und zum anderen die ermittelten Aufspannkoordinaten zu einer kollisionsfreien und damit validen Fertigung führen.

- Für die Reduzierung der Zykluszeit wird in der ersten Phase eine Optimierung (Minimierung der Zeit) mittels Metaheuristik angestrebt. Dabei wird die PSO genutzt, deren Algorithmus dahingehend erweitert werden muss, dass eine hohe Anzahl der Simulationsläufe reduziert wird. Folglich sind Werkstückpositionen im Lösungsraum (Arbeitsraum) ohne hohen Zeitaufwand identifizierbar. Die Metaheuristik generiert unter der Angabe mehrerer Dimensionen (zwei und drei) potenzielle Aufspannkoordinaten. Die Dimensionen repräsentieren hierbei die translatorische Werkstückverschiebung in die Achsenrichtungen x , y sowie der Orientierung θ (um die z -Achse). Als vierte Dimension könnte die translatorische Variation der z -Richtung in Frage kommen. Dies wird im Rahmen des Ansatzes zunächst nicht fokussiert, da es implizieren würde, dass das Werkstück in variabler Höhe aufgespannt werden müsste.¹¹¹ Dies ist nur dann praxistauglich, wenn z. B. ein sich kontinuierlich änderndes (anpassbares) Spannmittel zur Verfügung stehen würde.

Als Eingabegröße dient ein reales NC-Programm. Mithilfe einer gegebenen NC-

¹¹⁰ Durch sukzessives Probieren und damit verbundener Vorbereitungsaufwand zur Einrichtung der Überprüfung und manueller Sichtung der Ergebnisse.

¹¹¹ Die Verarbeitung der translatorischen Aufspannvariation in z -Richtung wird lediglich am Rande der Versuche aufgenommen.

Parser-Applikation wird die Fertigungszeit des NC-Programms, die auch die Zykluszeit beinhaltet, abgeschätzt. Durch die Zielsetzung der reduzierten Zykluszeit werden die durch die PSO bereitgestellten potenziellen Lösungen dahingehend bewertet, dass die Partikel, die zu einem globalen Minimum führen, als Lösungskandidaten in Frage kommen. Hierbei wird die schnelle Konvergenz der Metaheuristik ausgenutzt.

Eine Weiterverarbeitung der potenziellen Lösungen mittels Clustering-Verfahren leitet die zweite Phase ein: In der zweiten Phase werden die potenziellen Lösungen hinsichtlich der Kollisionsinformation validiert, um der Anforderung gerecht zu werden, kollisionsfreie Koordinaten zu erhalten.

- Die Kollisionsüberprüfung erfolgt durch eine automatisierte Ansteuerung der vWZM. Dabei werden die zuvor identifizierten Koordinaten (potenzielle Lösungen) automatisiert eingelesen und in die jeweilige zu simulierende „Fertigungs-Session“ inklusive NC-Programm, Werkzeugen und Spannmittelpositionierung integriert. Vorab werden die potenziellen Lösungskandidaten, die zunächst nur Informationen über die Zykluszeiten aufweisen, durch ein Partikel-Clustering-Verfahren in Lösungspakete unterteilt, die auf die zur Verfügung stehenden vWZM-Ressourcen verteilt und abgeprüft werden. Dabei umfassen die Partikel-Cluster potenzielle Aufspannlösungen auf dem Maschinentisch. Die Anzahl der Cluster geht mit der Anzahl der Simulationsmodelle (vWZM-Instanzen) einher. Durch diese Strategie werden Einsparungen bei der Anzahl der notwendigen Simulationsläufe angestrebt, und der Lösungsraum (Suchraum) kann effizienter durchsucht werden.
- Des Weiteren wird der Metaheuristik-Algorithmus als asynchrone und teilasynchrone PSO entwickelt, um die Möglichkeit zu erhalten, die zu evaluierenden Fitnessparameter automatisiert in asynchroner Form an mehrere Ressourcen verteilen zu können. Damit kann eventuellen Rechnerausfällen begegnet werden. Dazu wird in Anhang A1 ein Exkurs dargestellt, der aus akademischer Sicht interessant ist, aber für den praktischen Nutzen des Aufspannverfahrens im Rahmen dieser Arbeit zunächst sekundär bleibt. Bei der vorgesehenen Lösung wird allgemein davon ausgegangen, dass die Validierungsläufe mittels Simulation an verschiedene Rechner verteilt werden, die jeweils eine Maschineninstanz beinhalten. Es werden keine Rechnerausfälle zugelassen.
- Die Werkstückpositionierung wird in Abhängigkeit von einem Fertigungsauftrag automatisch angesteuert. Die Fertigungsaufträge werden dazu vorab über eine Benutzerschnittstelle in eine Datenhaltung eingepflegt. Ein Event wird nach Eingabeabschluss ausgelöst, sodass unmittelbar valide Parameter und zykluszeitreduzierende Werkstückpositionskoordinaten generiert werden.

Der Status bzgl. der Validität und die zugehörige Zykluszeit werden ebenfalls in die Datenhaltung für eine Weiterverarbeitung abgelegt. Folglich wird der Planer bzw. Mitarbeiter (Systembediener) nicht über eine (ungewisse) Zeitspanne an ei-

nen Rechnerarbeitsplatz gebunden, um visuell ungewollte Kollisionen zu verfolgen. Insgesamt wird dadurch (Arbeits-)Zeit eingespart, um sich weiteren Planungsaufgaben im Rahmen der Arbeitsvorbereitung zu widmen.

- Folgeerprobungsprozesse von Aufträgen mit identischen NC-Programmen werden mit bereits bekannten Werkstückpositionskoordinaten abgeglichen, und die bereits bekannten besten Parameter werden verwendet. Dazu wird vorab eine Überprüfung vorgenommen. Die Aufträge können sich dabei inhaltlich unterscheiden, solange keine abweichende Zielgeometrie und kein abweichendes NC-Programm verfolgt werden.
- Erprobt werden die Werkstückpositionierung und die Anbindung an die virtuelle Werkzeugmaschine inklusive notwendiger Datenhaltung anhand realer NC-Programme. Die Koordinaten werden dabei über die gesamte Anwendung des Verfahrens unverändert übernommen und würden sich in der praktischen Fertigung mit einer realen Maschine wiederfinden, sodass eine durchgängige Lösung gewährt wird.¹¹²

Die Trennung der Werkstückpositionierung in zwei sukzessiv folgende Ansätze ergibt sich insgesamt aus dem Umstand, dass aufwendige Simulationsläufe vermieden werden müssen. Eine hohe Anzahl an potenziellen Werkstückpositionen trägt zu einem Simulationsüberhang bei. Insgesamt werden zunächst die zeitreduzierenden Koordinaten identifiziert, wobei das Simulationsmodell nur noch eine kollisionsüberprüfende Funktion beinhaltet.

4.2 Werkzeugpositionierung zur Reduzierung der Zykluszeit auf Basis realer NC-Programme

Eine Reduzierung der Nebenzeiten (als Teil der Zykluszeit) durch verringerte Werkzeugwechseloperationszeiten (Magazinrotation) sowie Rüstzeiten kann mittels proaktiver Werkzeugpositionierung im Magazin adressiert werden. Der Werker erhält hierzu eine Startpositionierung als Ausgangspunkt.

Dazu ist ein Modell (MWZW) notwendig, das sich, wie das Vorbild der virtuellen Werkzeugmaschine, an dem Verhalten einer realen Maschine orientiert. Rüstprozesse durch den Menschen sind dabei ebenfalls eingeschlossen. Damit kann gewährleistet werden, dass aufgrund bestimmter Handlungsalternativen bzgl. der Positionierung von Werkzeugen in dem Magazin auch reale Zeitersparnisse erzielt werden, die die Nebenzeit reduzieren. Die relevanten Prozesszeiten für das zugrunde liegende Modell sind in Abhängigkeit des Maschinentyps individuell anpassbar, wodurch das Modell einen generischen Charakter erhalten würde. Die einzelnen Prozesse und gemessenen Zeiten bzgl. der Werkzeugwechseloperationen und -situationen werden durch ein Distanzmaß bewertet, um eine Güte bzgl. der Startbelegung der Werkzeugpositionierung zu erhalten. Dabei werden wechselbezogene Werkzeugpositionierungsprozesse während des Fertigungsprozesses

¹¹² Dieser Vorgang ist „quasi“ mit einer virtuellen Inbetriebnahme (VIBN) gleichzusetzen.

sowie Wechselprozesse des Werkzeugs von außerhalb der Maschinenumgebung in das Werkzeugmagazin und äquivalent vom Werkzeugmagazin in den Außenbereich der Maschine abgebildet. Die Werkzeugpositionierung sorgt demnach dafür, dass kurze Werkzeugwechseloperationen durch die Magazinbewegung als Relativbewegungen zwischen dem Magazinplatz des aktuell eingewechselten Werkzeugs und des nachfolgenden Werkzeugs möglich sind.

- Zur Erstellung des Modells sind die Prozesszeiten bestimmter Werkzeugwechsel- und Magazinbestückungshandlungen notwendig, die zeitlich erfasst werden müssen und durch Gleichungen ausgedrückt werden. Die Zeiterfassung einzelner Prozesse erfolgt empirisch anhand einer realen Maschine und basiert auf der Erfassung von Span-zu-Span-Zeiten (SSZ) unter Berücksichtigung der Anleitung zugehöriger technischer Datenblätter. Die Gleichungen orientieren sich an den menschlichen Handlungen beim Einrichten und Rüsten einer Werkzeugmaschine hinsichtlich der werkzeugmagazinbezogenen Arbeitsschritte. Dadurch sind die gemessenen Zeiten nachvollziehbar und reproduzierbar.
- Die Werkzeugwechselbefehle müssen des Weiteren automatisch aus dem NC-Programm extrahiert und in eine Datenhaltung unter eindeutiger Angabe der jeweiligen Werkzeuge gespeichert werden. Dabei werden auch die aktuellen Zustände der Werkzeuge (insb. auch für eine Standzeitberücksichtigung) erfasst. Die Informationsextraktion der Werkzeugwechselbefehle sowie die Errechnung der Eingriffszeit zum Abschätzen der Reststandzeit erfolgen über eine dafür entwickelte NC-Parser-Applikation.
- Zudem können die Standzeiten der einzelnen Werkzeuge als fester Empfehlungswert vom Hersteller (Fixbetrag) definiert werden. Die Magazinbestückung kann abhängig von der eingestellten Parameterkonfiguration während der Fertigung und der resultierenden (Rest-)Standzeit durch den Eingriff des Werkzeugs (Werkzeugeingriffszeit, werkzeugspezifische Hauptzeit) erfolgen. Standzeitkritische Werkzeuge können vor Fertigungsbeginn ausgewechselt werden, und Werkzeugwartungsintervalle sind transparenter. Dabei ist es zielführend, die Standzeitüberprüfung jeweils vor der Werkzeugpositionierung als *preprocessing* durchzuführen, damit keine Werkzeuge in der Startbelegung vorzufinden sind, die die Standzeit auf Basis des NC-Programms nicht einhalten. Folgewerkzeuge werden damit ebenfalls vorab aussortiert.
- Grundsätzlich ist es wichtig, eine Werkzeugpositionierung zu ermitteln, die die Startbelegung ermittelt, die die Rotationszahl im Werkzeugmagazin gering hält. Dabei wird auch die Magazinkapazität berücksichtigt. Bei Überschreiten der Kapazität wird zunächst eine erste Positionierung vorgenommen, und für die Rest-Werkzeuge, die nicht in das Magazin aufgenommen werden konnten, wird eine Neu-Positionierung durch das Modell durchgeführt. Das führt zwangsläufig dazu, dass die Fertigung unterbrochen wird, alle Werkzeuge aus dem Magazin entnommen werden müssen und danach die Neu-Positionierung auf Basis der Ergebnisse aus dem Modell erfolgt. Es ist dazu theoretisch denkbar, „Wegwerf-Strategien“

zu entwickeln, die berechnen, welche Werkzeuge unter Berücksichtigung der Kapazitätsrestriktion aussortiert werden. Dies wird jedoch nur theoretisch erwähnt und nicht weiterverfolgt, da eine häufige Fertigungsunterbrechung durch ständige Neu-Positionierung¹¹³ der Werkzeuge (im Vorhinein) vermieden werden soll.

- Als Vergleichsmodell zur Optimierung einer Werkzeugpositionierung wird ein lineares Optimierungsmodell (LP) erstellt und mittels *Solver* gelöst. Dieses Modell bildet einen generisch allgemeinen Fall ab und orientiert sich nicht nur an einer einzigen Maschine. Mithilfe der gemessenen Prozesszeiten kann das Ergebnis der Optimierung in ein Bewertungsmaß überführt werden, womit das Ergebnis des LPs mit dem Ergebnis des heuristischen Modells (MWZW) verglichen werden kann. Daneben werden anhand einer Befragung von realen Personen geplante Starbelegungen ermittelt, um diese ebenfalls mit den Modellen zu vergleichen.
- Für die Abschätzung der Reststandzeit und zur wahlweise möglichen Variation geeigneter Vorschub- und Schnittgeschwindigkeitsparameter für das NC-Programm, wird ein theoretisches Konzept entwickelt, das auf das oben genannte *preprocessing* aufbaut und sich auf die Werkzeug- und Maschinen-Gerade nach *Dietrich* und *Tschätsch* (vgl. [DiTs14]) stützt. Dazu werden aus dem zugrunde liegenden NC-Programm ebenfalls die Werkzeugwechselbefehle und die Eingriffszeiten der betreffenden Werkzeuge identifiziert. Auf dieser Basis wird eine Anpassung von Fertigungsparametern wie Vorschubgeschwindigkeit oder Drehzahl vorgenommen, sodass die geschätzte Standzeit eingehalten werden kann. Hierbei gilt die Annahme, dass ein optimales Prozessfenster möglich ist. Dazu ist es ebenfalls notwendig, die Datenhaltung um Herstellerangaben (Tabellenwerke) zu erweitern. Die Überprüfung dieser Parameterveränderung unter realen Fertigungsbedingungen – insb. das Verhalten der Schneid- und Werkstoffe und die Bauteilqualität – ist im Rahmen der Arbeit nicht möglich.

Damit könnten mögliche konstruktive Veränderungen und Entwicklungen abgeschätzt werden, die die Frage beantworten, inwiefern Werkzeuge verändert werden müssten, sodass diese exakt zur gegebenen Maschine und zu den verbundenen Parametern kompatibel sind. Damit wird das Ziel angestrebt, dass die aus Parameterkombinationen entstehenden Werkzeug- und Maschinen-Geraden so aufeinander abgestimmt werden, dass sich nicht nur ein optimaler Arbeitsbereich ergibt, sondern unendlich viele (optimale) Parameterkombinationen, ohne dass das Werkzeug oder die Maschine überfordert wird.

¹¹³ Eine Wegwerf-Strategie kann die Gefahr eines kontinuierlichen Neu-Positionierens beinhalten, was für die praktische Anwendung ungünstig ist.

4.3 Erstellung und Erprobung von Benutzerschnittstellen für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung

Um Daten zur Werkstück- und Werkzeugpositionierung informationstechnisch für weitere Funktionen zur Verfügung zu stellen, wird eine Benutzerschnittstelle (GUI) geschaffen. Diese unterstützt einen *Workflow*, sodass die Nutzer Aufträge erstellen können und durch den Abschluss der Auftragsgestaltung ein Event ausgelöst wird, das die Werkstückpositionierung ansteuert. Die Werkzeugpositionierung kann vom Auftrag losgelöst erfolgen, da dazu nur die Werkzeuginformation und das NC-Programm vorliegen müssen. Es wird auch ein nutzerindividueller Login-Bereich eingerichtet, sodass jeder Nutzer, unabhängig ob er betriebsintern oder extern agiert (zugewiesene Rollen und Rechte), auf seinen Daten-Bereich zugreifen kann.

Durch den Nutzer-Login wird ferner gewährleistet, dass die entwickelten Verfahren z. B. cloudbasiert nutzbar bzw. über ein Netzwerk online (ortsunabhängig) verfügbar sind. Zudem wird eine Verknüpfung zwischen Werkstückpositionskoordinaten, NC-Programm und zugrunde liegendem Fertigungsauftrag realisiert. Eine zweifelsfreie Zuordnung der Einrichtparameter der Werkzeugmaschine ist damit möglich, die von Werker und Planer sowie dritten Mitarbeitern nachvollziehbar ist. Die Werkstück- und Werkzeugpositionierung greift hierbei auf eine identische Datenhaltung zu.

Mithilfe der Benutzerschnittstelle ist der Nutzer ebenfalls in der Lage, Werkstückgeometrien zu definieren. Der Prozess, bei dem aus der Datenschnittstelle für das Simulationsmodell die NC-Programme extrahiert und relevante Dateninhalte aus der Schnittstelle (VMDE) weiterverarbeitet werden, wird ebenfalls angesteuert. Die Benutzerschnittstelle wird durch gängige Programmiersprachen realisiert. Zudem wird der Versuch unternommen, den erarbeiteten Workflow zur Definition eines Auftrags und zum Ansteuern der Werkstückpositionierung mithilfe einer Kollaborationsplattform zu realisieren. Dazu besteht Zugang zu MSSP.

5 Konzept

5.1 Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkstückpositionierung

5.1.1 Die erweiterte Zykluszeit

Zykluszeit wird in mehreren Kontexten unterschiedlich definiert. Im Bereich der Produktionswirtschaft wird unter Zykluszeit die Zeit verstanden, die notwendig ist, um auf einer maschinellen Anlage ein definiertes Produktionsprogramm abzuschließen [Tys00].

Aus dem Bereich „Lean-Produktion“ wird Zykluszeit als die Zeitspanne definiert, in der ein Mitarbeiter einen vorgesehenen Bearbeitungsschritt vollständig durchgeführt hat und neue, nachfolgende Prozessabfolgen durchlaufen wird. Dabei kann ein Prozessschritt in verschiedenen-granularen Perspektiven verstanden werden: In der Regel besteht ein fertigungsbezogener Prozessschritt (Fertigungshandlung) z. B. aus „Drehen“, „Bohren“, „Montieren“, „Prüfen“ usw., sodass sich die Zykluszeit aus der Kombination verschiedener Prozesse ergibt (vgl. [Wic14-ol]).

Definition 15: Zykluszeit im Fertigungskontext

Auf Basis von NC-Befehlen aus NC-Programmen, die sich zu NC-Sätzen zusammensetzen, und unter den Gegebenheiten der zugrunde liegenden Werkzeugmaschine wird unter Zykluszeit die Summe aus der Hauptzeit sowie den Einzelzeiten zum Anfahren, Zustellen und Abheben sowie der Rückläufe verstanden (vgl. [DiTs14]).

Die Definition reicht aus, um die Aussage zu treffen, dass die Werkstückpositionierung einen Einfluss auf die Zykluszeit hat, jedoch reicht die Definition nicht aus, um zu gewährleisten, dass die Werkzeugpositionierung direkt auf die Zykluszeit einwirkt, sodass eine erweiterte Zykluszeit definiert wird. Diese beinhaltet auch Bestandteile der Nebenzeiten, die ansonsten keine Beachtung finden würden. Dazu wird zunächst die Nebenzeit t_N wie folgt definiert und abgegrenzt:

Definition 16: Nebenzeit

Nach [REFA58] ist die Nebenzeit „derjenige Teil der [Gesamtzeit] je Einheit, der zwar regelmäßig auftritt, aber nur mittelbar zu einem Fortschritt im Sinne des Auftrags beiträgt“ (vgl. [REFA58]).¹¹⁴ Mit Nebenzeiten sind also alle Abläufe gemeint, die notwendig sind, einen Prozessablauf als Ganzes zu ermöglichen. Dazu zählen auch Vorbereitungsarbeiten von Werkzeugen, das Bestücken des Magazins, aber auch allgemeine Bestandteile eines Zyklus, die nicht die Hauptzeit betreffen.

¹¹⁴ Eine vergleichbare Definition ist auch in [Lan65] zu finden.

Definition 17: Hauptzeit

Auf Basis von REFA ist die Hauptzeit „derjenige Teil der [Gesamtzeit] je Einheit, bei dem ein unmittelbarer Fortschritt an den einzelnen Einheiten oder Arbeitsgegenständen ... im Sinne des Auftrages entsteht“ (vgl. [REFA58]).¹¹⁵ Im Rahmen der Arbeit ist die Definition als Interpretation ausreichend: Unter Hauptzeit wird die Zeit verstanden, in der ein unmittelbarer Arbeitsfortschritt erreicht wird. In der Literatur wird sie auch als Maschinenzeit verstanden. (vgl. [DiTs14])

Die Summe aus der Haupt- und Nebenzeit ergibt die Gesamtzeit¹¹⁶ t_G für den Fertigungsprozess (vgl. [AWS16-ol]). Somit ist die erweiterte (NC-Programm-spezifische) Zykluszeit (EZZ_{NC}) als die Summe der Hauptzeiten, zyklusrelevanten Nebenzeiten sowie Werkzeugpositions- und -wechselzeiten ($t_{Werkzeug}$) definiert. In der Begriffsabsummierung nicht eingeschlossen sind allgemeine Vorbereitungszeiten bzw. Werkzeugwartungsintervalle sowie weitere Werkzeugmaschinenwartungs- und Einrichtzeiten wie Mess- und Abtastvorgänge, die jedoch als Sammelvariable (t_{Rest}), wenn sie erfassbar sind, aufgeführt werden können. Die hier abgegrenzten Begriffe sind in einer schematischen Übersicht in Abbildung 10 dargestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die veränderten Zeiten insgesamt durch die variierende Werkstück- und Werkzeugpositionierung somit unter der erweiterten Zykluszeit EZZ_{NC} erfasst.

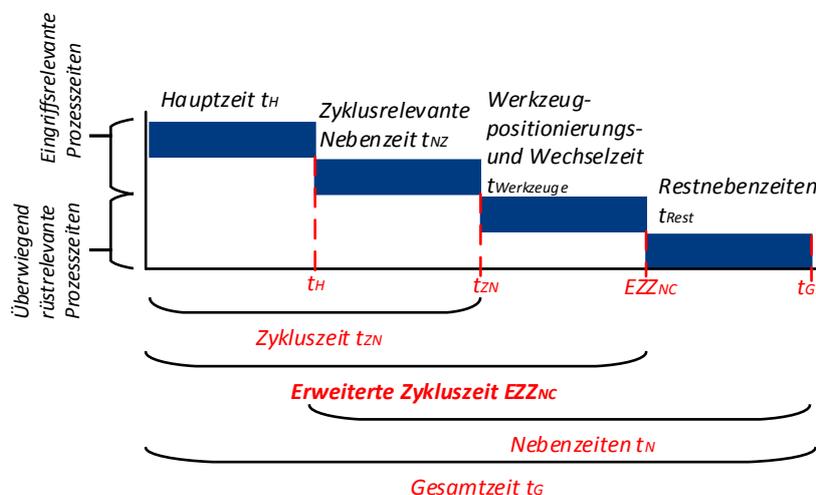


Abbildung 10: Abgrenzung der Zykluszeit

Die hier abgegrenzte Zykluszeit ist zudem nicht prozessorientiert zu verstehen, sondern NC-orientiert. Das bedeutet, dass nicht die einzelnen Prozesse, wie z. B. Fräs-, Bohr-, Gewindeschneidprozesse, getrennt und als in sich geschlossene Prozesse betrachtet werden, sondern jeweils ein gegebenes NC-Programm, das diese Prozesse enthalten könnte, fokussiert wird. Die Koordinatenangaben der NC-Befehle (inklusive NC-Sätze) und die

¹¹⁵ Eine vergleichbare Definition ist auch in [Lan65] zu finden.

¹¹⁶ In [REFA58] S. 15 wird die Summe aus Haupt- und Nebenzeit auch als Grundzeit bezeichnet.

verbundenen Werkzeugaufrufe des NC-Programms beinhalten die Fertigungsprozesse gleichermaßen, sodass die verbundenen Prozesse einfach als gesamte Zeiteinheiten aufgenommen werden. Die erweiterte Zykluszeitreduzierung gilt also für das gesamte NC-Programm und wird demnach nicht nur auf einen einzelnen Fertigungsprozess bezogen. Somit sind auch alle notwendigen Werkzeugwechsel und bedingten Werkzeugpositionen relevant.

Nach der hier erfolgten Begriffsabgrenzung stellt sich allgemein die Frage, warum nicht insgesamt die Zykluszeit t_{ZN} als angestrebte Reduzierungskomponente fokussiert wird, sondern die konkretisierte Form als „erweiterte Zykluszeit“ EZZ_{NC} einbezogen wird. Äquivalent zur EZZ_{NC} deckt die Zykluszeit t_{ZN} auch die Hauptzeit ab, die nur den Schneideneingriff des Werkzeugs sowie den verbundenen Werkzeugweg am Werkstückeingriff erfasst. Dieser ist jedoch nicht zwangsläufig für die Reduzierung relevant, da der Werkzeugeingriff auch durch veränderte Positionskordinaten des Werkstücks auf globaler Arbeitsebene, bedingt durch das NC-Programm, weitestgehend konstant bleibt. Jedoch kann eine Reduzierung der Hauptzeit durch Positions- oder Orientierungsänderungen des Werkstücks im Arbeitsraum nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Im Vergleich zur Zykluszeit t_{ZN} deckt EZZ_{NC} die Werkzeugwechselzeiten außerhalb der Arbeitsraumumgebung (des Simulationsmodells), Werkzeugaus- und -einbauprozesse (Magazinbestückung) sowie Fertigungsunterbrechungen durch Unterschreitungen von Reststandzeit-Grenzwerten o. Ä. ab. Diese Größen sind für die Festlegung und Verbesserung von Werkzeugpositionen notwendig.

Die Zykluszeit t_{ZN} berücksichtigt daneben nur Werkzeugwechsel auf NC-Programm-Basis, indem Verfahrswege (Zu- und Abfahrzeiten, t_{NZ}) zwischen Werkzeugwechsellpunkt und Werkzeugeingriffspunkt erfasst werden. Das führt dazu, dass für die Werkstückpositionierung im Arbeitsraum der Maschine die Zykluszeit t_{ZN} im Fokus steht, die einen Bestandteil von EZZ_{NC} ausmacht. Das heißt, wenn t_{ZN} reduziert wird, dann wird EZZ_{NC} (t_H bleibt konstant) ebenfalls reduziert. Die für die Werkzeugpositionierung im Magazin definierte Variable $t_{Werkzeug}$ reduziert sich durch eine verbesserte (alternative) Werkzeugpositionierung, da ferner die Werkzeugwechselzeiten reduziert würden und damit ebenfalls EZZ_{NC} reduziert wäre.

Des Weiteren stellt sich die Frage, warum die Nebenzeit t_N nicht fokussiert wird, in der t_{NZ} anteilig und die Zeiten zur Werkzeugpositionierung enthalten sind. Diese Fragestellung lässt sich zunächst wie folgt beantworten: Die Nebenzeit t_N beinhaltet Restnebenzeiten, die im Rahmen der Arbeit deswegen nicht weiter von Bedeutung sind, da sie außerhalb der Simulationsumgebung gemessen werden und anderen, nichtdeterministischen Abhängigkeiten unterliegen. Dazu zählen z. B. Wartungsintervalle von Werkzeugen, die auch außerhalb der betrachteten Werkstückpositionierung (und sogar außerhalb der Werkzeugpositionierung liegen) stattfinden und zeitlich nicht erfasst sind – formal wird dazu eine Sammelvariable eingefügt. *Auch werden Werkzeugmagazinbewegungen und der Werkzeugwechselprozess durch die Werkzeugwechsellvorrichtung nicht durch das gegebene Modell (virtuelle Werkzeugmaschine) in zeitlich abgegrenzter Form erfasst.* Im

Rahmen der Werkzeugpositionierung wird zudem davon ausgegangen, dass alle Werkzeuge mit einer Reststandzeit > 0 einsatzbereit zur Verfügung stehen.

Durch die Einbeziehung der zyklusrelevanten Nebenzeiten t_{NZ} (ausgehend von t_{ZN}) und der Werkzeugpositionszeit $t_{Werkzeug}$ sind alle hinreichenden Zeitgrößen enthalten, die für die erweiterte Zykluszeitreduzierung eine ausreichende Schnittmenge bilden. Da jedoch die Werkzeugpositionierung auch zwangsläufig von den Werkzeugreststandzeiten abhängt, gibt es einen korrelierten Zusammenhang zwischen dem Einhalten der Standzeiten und der Wahl bestimmter Fertigungsparameter, wie z. B. der Vorschubgeschwindigkeit v_f . Verdeutlicht wird dies dadurch, dass die Größe v_f auch in der Formel (Definition) für die Hauptzeit enthalten ist. Damit besteht die Möglichkeit, dass durch die angestrebte Zeitreduzierung und die Veränderung der Standzeitgrenzwerte auch die Nebenzeit global verändert wird. Ferner fließen Standzeitgrenzwerte als Restriktion ebenfalls in das Reduzierungsziel mit ein. Damit ist es sinnvoll, als zyklusreduzierende Größe die Gesamtzielgröße EZZ_{NC} zu definieren, wobei die veränderlichen Größen $t_{ZN} = t_H + t_{NZ}$ und $t_{Werkzeug}$ fokussiert werden.

Formalisierung: Die Hauptzeit lässt sich in der Regel für alle spanende Fertigungsprozesse bestimmen und wird durch die Gleichung

$$t_H = \frac{L_{Distanz} * i}{f * n_c} = \frac{L_{Distanz} * i}{v_f} = \sum_{j=1}^i \frac{L_{Distanz,j}}{f_j * n_{c,j}} = \sum_{j=1}^i \frac{L_{Distanz,j}}{v_{f,j}} \quad (5.1)$$

Ausgedrückt, wobei $L_{Distanz}$ die abgefahrenen Wege¹¹⁷ des Werkzeugs angibt, i die Anzahl der Eingriffe am Werkstück, f den Werkzeugvorschub und n_c die Hauptspindeldrehzahl. v_f ist die Vorschubgeschwindigkeit. f und n_c sind aus dem NC-Programm extrahierbar. $L_{Distanz}$ bzw. i sind durch Kurven-Interpolation sowie Abstandsberechnung, z. B. nach dem euklidischen Abstand zwischen zwei Zielkoordinaten, errechenbar.

Die direkt verbundene zyklusrelevante Nebenzeit t_{NZ} für einen Eingriff setzt sich als Summe aus Anfahr-, Zustell-, Abhebe- und Rücklaufzeit wie folgt zusammen:

$$t_{NZ} = \sum_{j=1}^i (t_{An,j} + t_{Zu,j} + t_{Ab,j} + t_{R,j}) \quad (5.2)$$

Die Zykluszeit t_{ZN} ergibt sich für ein NC-Programm und die damit verbundenen Schnittoperationen durch Addition von den Gleichungen 5.1 und 5.2:

$$t_{ZN} = t_H + t_{NZ} = t_H + \sum_{j=1}^i (t_{An,j} + t_{Zu,j} + t_{Ab,j} + t_{R,j}) \quad (5.3)$$

¹¹⁷ Die Werkzeugwege sind in der Hauptzeitanwendung nicht weiter spezifiziert.

Jeder Werkzeugeingriff (Schnitt i) bringt einen Einfluss auf die zyklusbedingten Nebenzeiten mit sich. Bestückungsvorgänge von Werkzeugen in und aus dem Werkzeugmagazin, die allgemein zu Rüstkosten gezählt werden können und die Nebenzeiten beeinflussen, kommen hinzu. Die Nebenzeiten erhöhen sich signifikant, wenn z. B. Rüstvorgänge durch das Werkzeugpositionieren während des Fertigungsprozesses, insb. die Neubestückung des Werkzeugmagazins, auftreten. Diese Nebenzeit erhöhenden Werkzeugpositionierungen werden auf die Zykluszeiten addiert, sodass sich die oben erwähnte „erweiterte (NC-Programm-spezifische) Zykluszeit“ EZZ_{NC} wie folgt ergibt:

$$\begin{aligned} EZZ_{NC} &= t_H + t_{NZ} + t_{Werkzeug} \\ &= t_H + \sum_{j=1}^i (t_{An,j} + t_{Zu,j} + t_{Ab,j} + t_{R,j}) + t_{Werkzeug} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Für die Reduzierung bzw. Minimierung¹¹⁸ ergibt sich die (gesamte) Zielfunktion:

$$\text{Min } EZZ_{NC} = t_{H,const.} + t_{NZ,min} + t_{Werkzeug,min} \quad (5.5)$$

Für die erweiterte (NC-Programm-spezifische) Zykluszeit gilt ferner $EZZ_{NC} \rightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$. Die Algorithmen für die Werkstückpositionierung, die im Kapitelverlauf dargelegt werden, ermitteln valide Werkstückpositionen, die insgesamt zu verringerten zyklusrelevanten Nebenzeiten t_{NZ} (Anteil an t_{ZN}) führen, womit t_{ZN} und folglich EZZ_{NC} reduziert werden (vgl. Kapitel 5.1.2). Durch die Werkzeugpositionierung können hauptsächlich die Prozesszeiten für die Bestückung und Umordnung des Werkzeugmagazins, ausgedrückt durch den Term $t_{Werkzeug}$, verringert werden (Nebenzeit t_N) und als Nebeneffekt eine Reduzierung der Hauptzeit t_H nach sich ziehen, wodurch EZZ_{NC} abermals reduziert wird (vgl. Kapitel 5.2). Die Reduzierung von t_H als Nebeneffekt kommt zustande, wenn die in der Zeit $t_{Werkzeug}$ eingewechselten Werkzeuge eine höhere Prozessgeschwindigkeit¹¹⁹ durch eine ausreichende Standzeit zulassen. Die gesamte Werkzeugverwaltungszeit wird wie folgt definiert:

$$t_{Werkzeug} = \sum_w^U t_{Werkzeug,w} \quad (5.6)$$

¹¹⁸ Die Minimierung bzw. Reduzierung erfolgt bei iterativen Suchprozessen bis ein definiertes oder dynamisches Konvergenzkriterium erreicht ist.

¹¹⁹ Die Prozessgeschwindigkeit erhöht sich, wenn es keine außerplanmäßige Werkzeugwechsel oder Magazin-Umordnungen (Ein- und Ausbauten) gibt, die durch z. B. mangelnde Standzeiten der Werkzeuge verursacht werden.

5.1.2 Such- und Prüfverfahren zur proaktiven Werkstückpositionierung zur Reduzierung der erweiterten Zykluszeit

Zur Verbesserung der Arbeitsplanung mithilfe der virtuellen Werkzeugmaschine (vWZM) für (allgemein) Fertigungs- und (konkret) Frässimulationen ist eine Positionsstrategie unumgänglich. Sie ermöglicht es dem Anwender und Planer, eine nahe-optimale (verbesserte) Aufspann- und Werkstückposition im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine zu erreichen. Diese Strategie ergibt sich also aus sinnvollen Suchvorgängen sowie der anschließenden Ersetzung der Aufspannkoordinaten durch die neuidentifizierten Aufspannkoordinaten. Auf diese Weise sollen durch eine mögliche Verschiebung der Werkstückpositionskoordinaten und die notwendige Anpassung des Nullpunkts verschiedene Spannmittel- und Werkstückorientierungen proaktiv untersucht werden. Die damit einhergehende Bereitstellung alternativer Koordinatendaten führt demnach zu einer verbesserten Einrichtsituation, die sich zeitreduzierend auf die erweiterte Zykluszeit auswirkt.

Definition 18: Strategie

„Eine Strategie ist in ihrer Bedeutung ein „genauer Plan des eigenen Vorgehens, der dazu dient, [...] ein wirtschaftliches [...] Ziel zu erreichen“, indem diejenigen Faktoren vorab kalkuliert werden, die in die eigenen Aktionen einfließen (vgl. [Dud16-01]).

Das allgemeine Ziel neben der Reduzierung der erweiterten Zykluszeit ist, umständliche und „lange“ Maschinenverfahren (Werkzeugwege) zu reduzieren oder zu vermeiden. Ergänzend wird eine Methode dargelegt, die umständliche und arbeitsintensive Suchprozesse (vgl. Kapitel 2.1.2 und 2.1.4) ausschließt (Ablösen der *DoE*), um somit Fertigungs- und Vorbereitungszeit einzusparen. Insgesamt sollen diese Positionierungsempfehlungen für den Maschinenführer, kombiniert mit den individuellen Bedienererfahrungen, bereitgestellt werden. Dies dient der Reduzierung oder im besten Fall der Vermeidung von Fehlerquellen durch zufälliges Positionieren von Werkstücken und Spannmitteln im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine.¹²⁰ Eine erweiterte Überprüfung des zugrunde liegenden NC-Programms bzgl. verschiedener Positionsparameter erfolgt dabei synergetisch, was durch eine kommerzielle Simulation mithilfe einer virtuellen Werkzeugmaschine nicht automatisch angeboten wird (vgl. [DVM16-01]) und bislang ein sukzessives Abfahren und manuelles Bestücken der Maschinensimulation erforderlich macht (vgl. Kapitel 2.1.2 und 2.1.3).

Die schematische Darstellung der Aufspannsituation auf dem Maschinentisch der Werkzeugmaschine ist in Abbildung 11 veranschaulicht. Die Abbildung 11 abstrahiert die Arbeitsräume der Werkzeugmaschine inklusive der zur Verfügung stehenden Maschinenti-

¹²⁰ Und damit einer verlängerten Maschineneinrichtzeit in der realen Fertigung.

sche, auf dem das Werkstück gelagert und mittels Spannmittel gegen Verrutschen gesichert wird. Der Wirkraum¹²¹, der von den Werkzeugen erreicht wird, verlässt den Arbeitsraum der Maschine nicht.

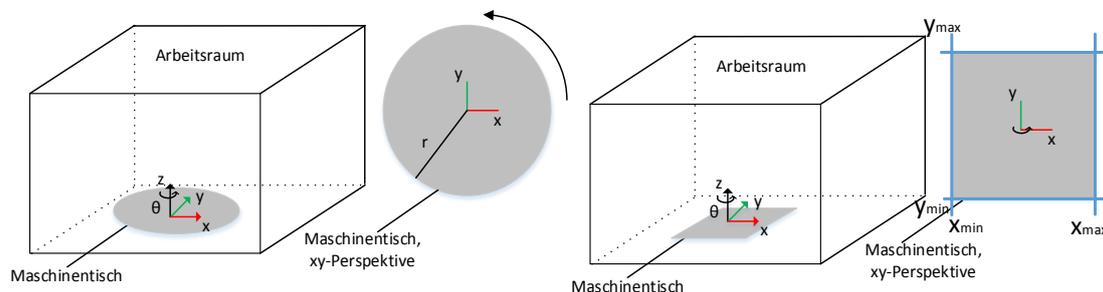


Abbildung 11: Schematisches Arbeitsraumprinzipien bei verschiedenen geometrischen Maschinentischformen

Die Aufspannposition kann sich durch translatorisches Verschieben des Werkstücks und der Spannmittel auf der xy -Ebene (in x - und y -Richtung) verändern und um die z -Achse mit dem Aufspannorientierungswinkel $\theta \in [0; 2\pi[$ in diskreter Form rotiert werden. Bei einer translatorischen Koordinatenverschiebung Δx_{trans} und Δy_{trans} bei einem kreisrunden Maschinentisch darf der Tischradius¹²² $r \geq \sqrt{x^2 + y^2}$ nicht überschritten werden (vgl. Abbildung 11, links). Für den Radius gilt ferner $r \geq 0$. Die zugehörige Drehmatrix im Raum R^3 für die z -Achse sei mit

$$R^z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

gegeben.

Für geometrisch rechteckige Tischmaße gelten dieselben Verschiebungen der Aufspannlage in translatorischer Richtung sowie rotatorischer Drehung um eine Achse. Formal gilt $y_{min} \leq y \leq y_{max}$ und $x_{min} \leq x \leq x_{max}$ mit $x, y \in \mathbb{R}$. Für den Orientierungswinkel um die z -Achse gilt nach wie vor $\theta \in [0; 2\pi[$ in Kombination mit der bekannten Drehmatrix $R^z(\theta)$. Zur Veranschaulichung dient die rechte Grafik in Abbildung 11.

Um die Positionierungsstrategien zu ermitteln, wird hierzu der Grundansatz aus der simulationsbasierten Optimierung (vgl. [MKR+11]) verfolgt, bei dem die Simulation durch das Modell der virtuellen Werkzeugmaschine gestellt wird. Diese Strategie ist in mehrere

¹²¹ Der Wirkraum bezeichnet hier den Bereich im dreidimensionalen Raum, der im Rahmen der Fertigungsoperationen unter Grundlage des NC-Programms durch das Werkzeug der Werkzeugmaschine angefahren wird. Im Bereich der Anthropometrie bezeichnet er den Raum, der anatomisch durch Längen und Beweglichkeit von Gliedmaßen bestimmbar und in der Regel durch das Sehfeld begrenzt ist (vgl. [DIN33400]). Bei einer Werkzeugmaschine ist dies reichweitebezogen auf die Bewegung der Arbeitspindel und der Werkzeuge bezogen.

¹²² Die Tischkante sollte auch bei alternativen geometrischen Tischformen nicht durch das Werkstück und die Spannmittel überschritten werden.

Ansätze unterteilt, die kombiniert implementierbar sind. Allgemein beinhaltet die simulationsbasierte Optimierung, wie sie in anderen wissenschaftlichen Gebieten eingesetzt wird (vgl. [LUE10]), eine Optimierungsschleife, deren Lösung über eine Simulation evaluiert¹²³ wird (vgl. Abbildung 12).

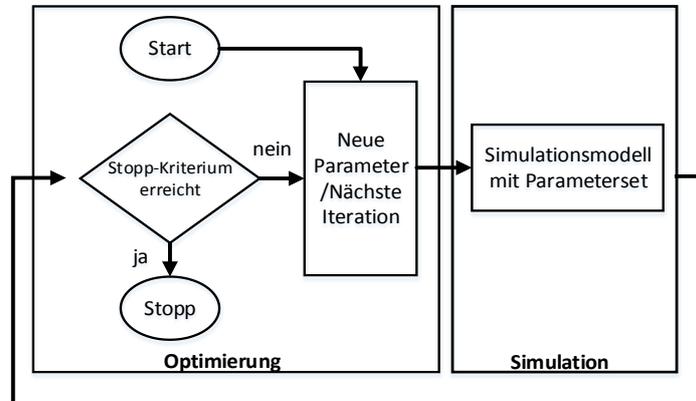


Abbildung 12: Schematische Darstellung der simulationsgestützten Optimierungsschleife (vgl. [MKR+11])

Im konkreten Fall der Werkstückpositionierung und anschließenden Abprüfung durch eine Werkzeugmaschinensimulation wird die Optimierung durch eine Metaheuristik verwirklicht. Bei den Metaheuristiken hat sich der Partikelschwarmoptimierungs-(PSO)-Algorithmus als praktisches Werkzeug erwiesen, da dieser als Parametrisierungskomponente für verwandte Probleme aus der Materialflusssimulation zu nutzbaren Ergebnissen geführt hat (vgl. [LUE10]). Der hierbei generierte Partikelschwarm lässt sich als Suchapplikation auf den Maschinenraum technisch beschränken, was den Lösungsraum verringert. Natürlich können auch alternative Metaheuristiken verwendet werden, die hinsichtlich verschiedener Benchmark-Kriterien und -Funktionen erprobt wurden (vgl. [WBD14]). Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die alternative Metaheuristik insgesamt zielführend sein muss, d. h., dass die Parameter, die optimiert werden sollen, eingepflegt werden können und die Implementierung EDV-fähig durchführbar ist sowie Randbedingungen, die durch das System „Werkzeugmaschine“ (auch als Simulation) gegeben sind, eingehalten werden: Als Randbedingungen gelten z. B. die Einhaltung des Arbeitsraums als Lösungsraum, das Lokalisieren von globalen und lokalen Optima oder das Verarbeiten physikalischer Wechselwirkungen. Für die Benchmark-Tests stellt die Griewank-Funktion (vgl. [Gri81]) eine sinnvolle Möglichkeit dar:

$$g(x, n) = \frac{1}{const} \sum_{k=1}^D x_k^2 - \prod_{k=1}^D \cos\left(\frac{x_k}{\sqrt{k}}\right) \quad (5.8)$$

Es gilt $g: \mathbb{R}^D \rightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$. Der Parameter D gibt die Anzahl der Dimensionen an, bei der $k \in \{1, 2, \dots, D\}$ gilt. x gibt den Variablenbereich an, der getestet wird. Bei der Nutzung des

¹²³ Die Simulation führt die Fitnessbewertung anstelle einer mathematischen Fitnessfunktion durch.

Partikelschwarm-Algorithmus enthält x den Lösungsvektor eines Partikels mit der Dimension D . Die Griewank-Funktion besitzt den Vorteil, dass sie viele lokale und globale Optima beinhaltet. Durch diese Eigenschaft kann in dem vorliegenden Fall das Konvergenzverhalten des Optimierungs-Algorithmus getestet sowie die Konfiguration des PSO-Algorithmus bzgl. eines gewünschten Konvergenzverhaltens vorgenommen werden.

Die direkte Anbindung der Metaheuristik an die virtuelle Werkzeugmaschine ist zunächst eine denkbare Lösungsidee, um automatisiert Aufspannparameter zu überprüfen. Dieser Ansatz ist jedoch in der praktischen Anwendung problematisch, da die durch die Metaheuristik initialisierte hohe Lösungsmenge (Schwarmgröße) zu einer hohen Anzahl einzelner (zeitintensiver) Simulationsdurchläufe durch die vWZM führt. Dies ist unpraktisch, wodurch dieser Ansatz eine Modifizierung dahingehend erfordert, die Simulationsdurchläufe zu verringern. Als zusätzliche Option ist es denkbar, die Validierung auf weitere Rechnerressourcen zu verteilen.

5.1.2.1 Erweiterung der Methode zur proaktiven Identifizierung der Werkstückpositionierung

Wie bei dem allgemeinen PSO-Algorithmus wird auch hier zunächst eine Population initialisiert (Erzeugung von Generationen von Partikeln) sowie die Position der Partikel (potenzieller Lösungsvektor) dem definierten Suchraum (Arbeitsraum der Werkzeugmaschine) zugeordnet. Jeder Partikel $p \in \mathbb{R}^D$ entspricht damit einer Aufspannsituation als Vektor aus \mathbb{R}^D inklusive G_m als m -te Generation. Die Generation G_1 besteht zu Beginn also aus zufällig generierten Partikeln p_1, p_2, \dots, p_i . Die Dimension des Lösungsraums wird durch d angegeben. Die Positionierung eines Werkstücks, das aus drei translatorischen Achsen besteht, wird durch drei kartesische Koordinaten dargestellt, wobei $D = 3$. Ein Partikelvektor, bestehend aus den kartesischen Koordinaten x und y in der Ebene zzgl. der Rotation um die z -Achse mit θ , repräsentiert ebenfalls die Dimension $D = 3$. Bei Beachtung der Bauteilrotation und der drei translatorischen Freiheitsgrade ist $D = 4$. Bei den Dimensionen ist zunächst die Aufspannposition in der Ebene bei $D = 2$ (x - und y -Achsen-Richtung) interessant, da es sich hierbei um die einfache Verschiebung auf dem Maschinentisch handelt, sowie mit $D = 3$, wenn θ einbezogen wird. Jeder Partikel wird hinsichtlich seiner besten Position mithilfe einer *Fitnessfunktion* evaluiert. Sollte eine Position eines Partikels dabei besser sein, d. h., zu einem „besseren“ Fitnesswert führen als die Position in der Evaluierung davor, orientiert sich der Partikel zu der neuen Position. Die besten Partikel geben insgesamt die Bewegungsrichtung vor (Standard-PSO-Algorithmus). Die einzelnen Schritte des Algorithmus werden iterativ durchgeführt, bis ein Stopp-Kriterium (Konvergenzkriterium) erreicht ist. Der Partikelschwarm-Algorithmus nach Eberhardt und Kennedy (vgl. [KeEb95]) ist formal wie folgt definiert:

$$v_i^{t+1} = \omega_{inertia} * v_i^t + \beta_1 * \omega_{cognitive} * (x_{globalbest} - x_i^t) + \beta_2 * \omega_{social} * (x_{localbest} - x_i^t) \quad (5.9)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (5.10)$$

v_i^{t+1} ist die aktualisierte „Geschwindigkeit“ des Partikels i , x_i^t ist die aktuelle Partikelposition, und die aktualisierte Position wird mit x_i^{t+1} angegeben. $x_{globalbest}$ bezeichnet das aktuelle globale Optimum, und $x_{localbest}$ definiert das lokale Optimum der aktuellen Generation. β_1 und β_2 sind Beschleunigungskoeffizienten und beeinflussen das Verhalten des „Schwarms“ hinsichtlich der Schnelligkeit und Konvergenz in die jeweilige Bewegungsrichtung, damit der PSO-Algorithmus für den zugrunde liegenden Anwendungsfall verwendet werden kann. $\omega_{cognitive}$, $\omega_{inertia}$ sowie ω_{social} sind Diagonalmatrizen mit zufälligen Parametern zwischen $[0,1)$. Dabei markieren die Indizes *social* und *cognitive* den gegenseitigen personellen Einfluss sowie den sozialen Einfluss der Partikel. Der Index *inertia* markiert die Diagonalmatrix für den Trägheitsfaktor. Die konkrete Einstellung der Gewichtungparameter hängt im hohen Maße von dem Anwendungsfall und der Zielsetzung ab, die mit der PSO verfolgt werden sollen. Wenn z. B. das Ziel verfolgt wird, lokale Optima zu erreichen, wird über β_2 und ω_{social} die Konvergenz auf diese Art beeinflusst, sodass sich der Algorithmus schnell dem lokalen Optimum (β_1 und $\omega_{cognitive}$ bleiben konstant) annähern wird und dabei bessere globale Lösungen mit geringerer Wahrscheinlichkeit gefunden werden (die „Schwarmausbreitung“ wird gering gehalten). Die in der vorliegenden Arbeit bewährten Einstellungen sind experimentell ermittelt worden und wie folgt gegeben:

$$\beta_1 = 0,3$$

$$\beta_2 = 0,6$$

Zusammengefasst erfolgt die Berechnung der neuen Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Schwarms aus der bisherigen Geschwindigkeit, der bisher „persönlich besten“ Position und der im Schwarm „besten“ Partikelposition. Die Verfahrensweise des Algorithmus wird in der Regel so lange fortgesetzt, bis der Fitnesswert der Partikel konvergiert. Die Fitnessbewertung der Partikel lässt sich danach sequenziell oder parallel durchführen (vgl. [RWL+15], vgl. Kapitel 5.1.2.2 und Anhang A1.1). Der Pseudocode zur PSO ist als Pseudocode 2 in Anhang A1.5 zu finden.

Einführung der NC-Parser-Applikation als Fitnesskomponente

Zur Reduzierung der Zykluszeit t_{zV} und damit einhergehend der erweiterten Zykluszeit EZZ_{NC} ist es sinnvoll, für die Positionsparameter bzw. den potenziellen Lösungsvektor der PSO der i -ten Iteration¹²⁴ eine schnelle Konvergenz zu erreichen, was durch die direkte Kopplung der PSO mit dem zeitaufwendigen Simulationsverfahren der vWZM unmöglich ist.¹²⁵ Für eine NC-gestützte Fertigung, die zu einer reduzierten Zykluszeit führt, wird daher die PSO an eine NC-Parser-Applikation anstelle der vWZM gekoppelt. Die

¹²⁴ Hier ist i eine Zählvariable für die Iteration und nicht gleichzusetzen mit dem Partikel i . Die Verwendung der Zählvariablen dient hier zur Erklärung.

¹²⁵ Die direkte Kombination zwischen PSO und vWZM wird im weiteren Verlauf des Kapitels hinsichtlich der festgestellten technischen Einschränkungen genauer konkretisiert und erläutert.

notwendigen NC-Zeiten liefert somit die NC-Parser-Applikation: Konkret bedeutet das, dass für die Verbesserung (Optimierung) der Aufspannposition von Werkstücken und Spannmitteln zunächst die Position angestrebt wird, bei der die geringste (ausgegebene) NC-Zeit enthalten ist. Mit NC-Zeit ist hier nicht die Rechenzeit gemeint, die notwendig ist, um das NC-Programm auszuführen, sondern die Zeit, die durch die NC-Befehl-Ausführung von Seiten einer Maschine sich als resultierende abgeschätzte Fertigungszeit (Bearbeitungszeit) ergibt. Diese Zeit enthält also in Summe die Hauptzeit aller Fertigungsprozesse aus dem zugrunde liegenden NC-Programm und die damit verbundenen zyklusrelevanten Nebenzeiten. Durch die mathematische Abschätzung der Zykluszeit auf Basis der Steuerbefehle des NC-Programms ist diese NC-Parser-Applikation performant, da die Zeiten in wenigen Sekundenbruchteilen ermittelt werden – allerdings ohne dabei Kollisionen zu berücksichtigen, sodass jede Aussage zunächst mit dem Präfix formuliert werden muss, „dass an dieser Position, die zu einer minimalen geschätzten Zykluszeit führt, keine Kollisionen auftreten bzw. eine unsichere Kollisionsinformation vorliegt“. Die ausgegebene Zeit der NC-Parser-Applikation in Verbindung mit der PSO würde demnach zu einer Reduzierung von t_{ZN} aus der Gleichung 5.3 als „Minimum“ führen.

Bei der Reduzierung von t_{ZN} liegt zunächst jeweils ein NC-Programm zugrunde mit i) Werkzeugeingriffen, $L_{Distanz}$ Werkzeugwegen und Angaben zu Vorschüben und Drehzahlen. Die Herausforderung bei dem verfolgten Ansatz liegt in der automatischen Identifikation, d. h. ohne das menschliche Eingreifen, von Positionen, die zu einer reduzierten erweiterten Zykluszeit führen und Kollisionsfreiheit gewährleisten. Die Erprobung und praktischen Anwendungen (vgl. 6.2) erfolgen ebenfalls ohne das menschliche Eingreifen auf einem Werkzeugmaschinenmodell (vWZM). Die Ansätze und Methodenerweiterungen dazu werden im weiteren Kapitelverlauf sukzessiv dargestellt.

Definition 19: NC-Parser-Applikation¹²⁶

Die NC-Parser-Applikation ermittelt aus den NC-Sätzen eines NC-Programms unter Verarbeitung von NC-Befehlen die geschätzte Fertigungs- bzw. Bearbeitungszeit (NC-Zeit) eines NC-Programms auf Basis der approximierten Bahnkurven, ohne dabei den Kollisionsstatus zu berücksichtigen.

Ein NC-Programm beinhaltet eine Menge an NC-Sätzen $N_{NC} = \{n_t \dots n_T\}$, die in Einfach- oder Vielschritten diskret durchnummeriert werden. Dabei besteht ein NC-Satz

¹²⁶ In der Arbeit werden mehrere NC-Parser-Applikationen verwendet. Die für die NC-Zeit-Abschätzung verwendete Version ist eine Fremdentwicklung der Firma *DMG Mori AG* im Rahmen des Forschungsprojekts *InVorMa* des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL* und wurde für weitere Experimente bereitgestellt. Die Urheberrechte liegen bei Herrn Dr. rer. nat. B. Jurke. Die Applikation approximiert auf Grundlage des G-Codes des NC-Programms die Fertigungszeit. Die Parser-Applikation zur Abschätzung der Fertigungszeit auf Basis der NC-Befehle im Rahmen der Werkzeugpositionierung und Standzeitberücksichtigung in Kapitel 5.2 (Eigenentwicklung) betrachtet die Werkzeugwechselbefehle des NC-Programms. Die Parser-Version zum Umgang mit der Werkstückorientierungsvariation (vgl. Kapitel 5.1.2.3) ist ebenfalls eine Eigenentwicklung, die bestimmte NC-Befehle im NC-Programm anpasst.

aus einem oder mehreren NC-Befehlen $N_l = \{g_1 \dots g_b\}$. Die NC-Parser-Applikation extrahiert mithilfe von regulären Ausdrücken (*engl. regular expression, Regex*) oder verwandten Verfahren die Fahr- und Wegbefehle eines NC-Programms und interpretiert Informationen wie die G-Befehle G0, G1, G2 und G3 sowie die Wegkoordinaten, die mit dem Werkzeug abgefahren werden.

Der Befehl G0 beschreibt den Eilgang und berechnet mittels linearer Interpolation und maximaler Vorschubgeschwindigkeit der x -, y - und z -Achse die Wegresultierende als direkte Anfahrt zur Zielcoordinate, ausgehend von der Coordinate aus dem Satz n_{T-1} als Startcoordinate. Der Befehl G1 verhält sich äquivalent, nur mit der zusätzlichen Angabe der Vorschubgeschwindigkeit v_f , die mit dem Buchstaben F und einer numerischen Zahl angegeben wird. Im NC-Programm ergeben sich für G1 folgende NC-Satzangaben:

N[Zahl] G1 X[Zahl] Y[Zahl] Z[Zahl] F[Zahl]

In kartesischen Koordinaten ist der resultierende Verfahrensweg für G0 und G1 durch die allgemeine Gleichung 5.11

$$|s| = \sqrt{s_x^2 + s_y^2 + s_z^2} \quad (5.11)$$

definiert. Mittels Vorschubgeschwindigkeit und der errechneten Weginformation ist hierbei auch die Verfahrzeit $t_{nc} = \frac{s}{v_f}$ ermittelbar.

Die lineare Interpolation¹²⁷ wird nach der Gleichung 5.12 allgemein für zwei Punkte durchgeführt:

$$f(x) = f_0 * \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0} + f_1 * \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (5.12)$$

Die Gleichung 5.12 kann für eine Strecke zwischen zwei NC-Koordinaten, vergleichbar mit einer Bahnkurve für unterteilte Abschnitte, fortgeführt werden. Je geringer die Punktabstände bei einer Bahn (bei steigender Absolutanzahl der Punkte), desto höher ist hierbei der Rechenaufwand, aber auch die Genauigkeit. Dabei können jedoch keine Kurven auf direktem Weg erzeugt werden, sodass die Unterteilung in verschiedene „kleinere“ Abschnitte sinnvoll ist. Eine Alternative besteht in der Berechnung von Polygonzügen, bei denen Polygonkanten $\xi_{k,i}$ und ein Berechnungswinkel $\Omega_{k,i}$ als Information notwendig sind. Eine nichtlineare Interpolation ist ebenfalls denkbar, wenn die Achsen einzeln unabhängig voneinander zu einer Bahn (Position) interpoliert werden.

¹²⁷ Die allgemeine Gleichung für die lineare Interpolation zwischen zwei Koordinaten lautet $f(x) = \sum_{k \in I} f_k * \frac{x_{k+1} - x}{x_{k+1} - x_k}$.

Für die Fahrbefehle G2 und G3 können unterschiedliche Beschreibungen im NC-Programm auftreten, die die NC-Parser-Applikation durch unterschiedliche Rechenoperationen interpretiert bei identischer Bahnkurve als Ergebnis. Die Kreisbahnberechnungen für G2 und G3 sind äquivalent zueinander, wobei die Befehle G2 die Kreisbahn der Werkzeuge im Uhrzeigersinn und G3 gegen den Uhrzeigersinn eine Bahninterpolation auslöst. Die Satzformatierung im NC-Programm sieht folgende Struktur vor (vgl. [Sin06], [Sin13]):

Kettenmaß:

N[Zahl] G2/G3 X[Zahl] Y[Zahl] I[Zahl] J[Zahl] F[Zahl]

N[Zahl] G2/G3 Z[Zahl] K[Zahl] I[Zahl] J[Zahl] F[Zahl]

Angabe von Kreisendpunkt und Kreisradius (CR):

N[Zahl] G2/G3 X[Zahl] Y[Zahl] CR[Zahl]

Die wichtigsten Berechnungsgrundlagen sowie die zugehörigen Bahnrechnungsarten werden im Folgenden aufgezeigt. Daneben gibt es noch weitere steuerungsspezifische Angaben für die G2-/G3-Befehle, die aber nicht weiter fokussiert werden, da sie in den Test-NC-Programmen für den entwickelten Ansatz nicht relevant sind. Dazu gehören Informationen über den Öffnungswinkel sowie den Mittelpunkt in Kettenmaß, Angaben von Zwischenpunkten und Angaben zum Kreisendpunkt.

G2 und G3 unter Verwendung von Kettenmaß:

Der NC-Satz zum Erreichen eines Zielpunkts bei einer Kreisbahn erfolgt durch die Koordinatendarstellung im Kettensatz. Dazu seien die kartesischen Zielkoordinaten x , y und z , bezogen auf den Programmnullpunkt, sowie I und J , die den Mittelpunkt der Kreisbahn in Kettenmaß definieren, gegeben. Die Mittelpunktdefinition für z ist häufig durch K festgelegt. I , J und K können bezogen auf den Programmnullpunkt vorliegen oder auch auf die Koordinate des Kreisanzugspunkts hinweisen. Ferner zu beachten ist hierbei, dass bei der Steuerung davon ausgegangen wird, dass nur zwei Achsen gleichzeitig angesteuert werden können (vgl. Kapitel 3.1.2.1). Als Zielkoordinate sind X_t und Y_t sowie der Vektor $(I, J)^T$ gegeben.

Damit ist der Kreisbahnmittelpunkt MI wie folgt definiert:

$$MI = (X_M, Y_M)^T = (X_{t-1}, Y_{t-1})^T + (I, J)^T \quad (5.13)$$

Der Radius r_{Kreis} der Kreisbahn ergibt sich aus dem Betrag des Vektors $(I, J)^T$:

$$r_{Kreis} = |(I, J)^T| = \sqrt{(I)^2 + (J)^2} \quad (5.14)$$

Daraus ergibt sich die Parameterdarstellung

$$\begin{pmatrix} X_t \\ Y_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_M \\ Y_M \end{pmatrix} + r * \begin{pmatrix} \cos \Phi \\ \sin \Phi \end{pmatrix}, \quad (5.15)$$

woraus sich der Startwinkel Φ_{t-1} sowie der Endwinkel Φ_t für die Interpolation wie folgt über die Beziehung

$$\cos \Phi = \frac{X_{t-1} - X_M}{r} \quad (5.16)$$

ergeben:

$$\Phi_{t-1} = \cos^{-1}\left(\frac{X_{t-1} - X_M}{r_{Kreis}}\right) \text{ und } \Phi_t = \cos^{-1}\left(\frac{X_t - X_M}{r_{Kreis}}\right)$$

Die Kreisbahnlänge $S_{K,G}$ ergibt sich wie folgt:

$$S_{K,G} = r * (\Phi_t - \Phi_{t-1}) \quad (5.17)$$

Die Abbildung 13 stellt den erläuterten Sachverhalt unter Angaben von Start- und Endpunkt sowie zugehörigen Koordinatenvariablen und Winkel exemplarisch dar.

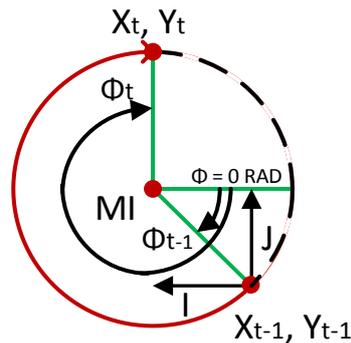


Abbildung 13: Schematische Darstellung zur Bahnkurvenberechnung mithilfe von Kettenmaß

Angabe von Kreisendpunkt und Kreisradius (CR) für G2 und G3:

Dazu seien die Endkoordinaten X_t und X_t und der Öffnungswinkel Φ_t gegeben. Auf Basis der Kreisgleichung lassen sich zwei Gleichungen wie folgt abbilden, woraus durch Gleichsetzen die Mittelpunktkoordinaten ermittelt werden können (vgl. Abbildung 14):

$$r_{Kreis} = \frac{\sqrt{(X_t - X_{t-1})^2 + (Y_t - Y_{t-1})^2} / 2}{\sin(\Phi_t / 2)} \quad (5.18)$$

$$(X_{t-1} - X_M)^2 + (Y_{t-1} - Y_M)^2 = r^2 \quad (5.19)$$

$$(X_t - X_M)^2 + (Y_t - Y_M)^2 = r^2 \quad (5.20)$$

$$\Rightarrow (X_{t-1} - X_M)^2 + (Y_{t-1} - Y_M)^2 = (X_t - X_M)^2 + (Y_t - Y_M)^2$$

Weitere Angaben und Berechnungen zu X_M und Y_M sind im Anhang aufgeführt.

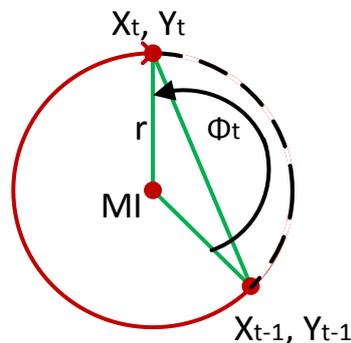


Abbildung 14: Schematische Darstellung zur Bahnkurvenberechnung mithilfe von Endpunkt und Radius

Mit der Formalisierung zur Bahnberechnung von G0, G1, G2 und G3 ist das Funktionsprinzip des Parsers dargestellt. Die Funktion zur Identifizierung der jeweiligen Geschwindigkeit sowie der Werkzeugbefehle werden ebenfalls berücksichtigt und für die Zeitberechnung von Haupt-, Neben- und Werkzeugwechselzeit miteinbezogen.¹²⁸ Weitere Verfahrensberechnungen basieren auf optionalen Angaben über Polarkoordinaten, Polarwinkel und -radius.

Durch die Unterscheidung der allgemeinen Werkzeugwege von regulären fertigungsrelevanten Eingriffszeiten am Bauteil durch die NC-Befehl-Interpretationen ist ebenfalls die Werkzeugwechselzeit¹²⁹ über den Verfahrensweg zum Werkzeugwechsellpunkt ermittelbar. Daraus sind auch die Zustellzeiten und andere Nebenzeiten ermittelbar. Die Grundlagen bilden hierbei ebenfalls die Zykluszeit (vgl. Gleichung 5.3) sowie die erweiterte Zykluszeit (vgl. Gleichung 5.4).

Aus formaler Sicht wird die NC-Parser-Applikation genutzt, um eine Maschinengeometrie und einen D-dimensionalen Vektor auf einen Skalar abzubilden:

$$nc: M_{Geom} \times \mathbb{R}^D \rightarrow \mathbb{R} \quad (5.21)$$

M_{Geom} beschreibt die Maschine (geometrische Daten und Achsenangaben) und \mathbb{R}^D die Werkstückposition im Arbeitsraum. Wie oben bereits erwähnt, sind keine Informationen enthalten, die angeben, ob die Werkstückposition bzgl. der Maschinengeometrie in den gegebenen Arbeitsraum (als Kollisionsvorbeugung) passt.

¹²⁸ Die Erkennung von Werkzeugwechseln sowie der Fertigungsgeschwindigkeit erfolgt durch die Extraktion der Information aus dem NC-Programm durch die NC-Parser-Applikation.

¹²⁹ Diese Zeit basiert auf den Zu- und Abführzeiten der Werkzeuge bei einem Wechselbefehl. Die Werkzeugmagazinrotationszeit wird durch die NC-Parser-Applikation nicht ermittelt.

Bei der Anwendung des PSO-Algorithmus in Verbindung mit der Werkzeugmaschine, unabhängig von der Konfiguration des Algorithmus (vgl. [LUE10], [KeEb95]), ist zu beachten, dass die Evaluation der Partikel (Fitnessbewertung) immer vollständig erfolgt sein muss, bevor die nächste Iteration mit angepassten Partikeln (nächste Generation) starten kann. Die Partikel stellen hierbei einen potenziellen Lösungsvektor dar.

Der beschriebene Standardfall kann somit als „synchrone Optimierung“ klassifiziert werden, die unter direkter Kopplung der (synchrone) PSO mit der vWZM nicht zielführend ist, da hierbei noch immer die Problematik besteht, dass eine hohe Anzahl an Simulationsdurchläufen provoziert wird, was durch das folgende Beispiel veranschaulicht wird: Bei 30 Partikeln als Schwarmgröße mit 100 Generationen als Stoppkriterium und insbesondere bei mehr als drei Dimensionen müssen pro Generation alle 30 Partikel als potenzielle Aufspannkoordinaten auf dem Simulationsmodell durchgeführt (evaluiert) werden. Wenn die Simulation geringe Zeiteinheiten benötigen würde, wäre dieser Umstand tragbar, wovon aber bei maßgeblich unendlich (theoretisch) vielen möglichen NC-Programmen nicht ausgegangen werden kann. Unter Einbindung der NC-Parser-Applikation als direkte Fitnesskomponente anstelle der vWZM wird diesem Problem entgegengetreten. Anwendungsfälle anhand realer Bauteilsimulationen stützen dieses Vorgehen.

Nach der Kopplung der PSO und der NC-Parser-Applikation als erste Phase erfolgt in der zweiten Phase die eigentliche Erweiterung durch ein Clustering-Verfahren. Anschließend erfolgt ebenfalls in der zweiten Phase die Evaluierung der Lösungen bzgl. der Kollisioninformation durch die Übermittlung der identifizierten zeitbesten Aufspannkoordinaten an die vWZM. Die Evaluationen der ersten Phase durch die NC-Parser-Applikation beinhaltet das Potenzial für ein parallelisiertes Vorgehen, auch wenn dies nicht unbedingt notwendig ist, da die erste Phase einen geringen Zeitaufwand benötigt.¹³⁰ Die vWZM in der zweiten Phase kann hingegen auf mehreren Rechneinheiten installiert werden, um somit Cluster-Lösungen parallel zu evaluieren. Als alternativer Ansatz wird eine mögliche Verbesserung der Aufspannposition des Werkstücks im Arbeitsraum der Werkzeugmaschine durch die Implementierung einer PSO-Erweiterung angeboten, die eine asynchrone, teil-asynchrone oder wahlweise voll-synchrone Evaluierung der Partikel ermöglicht. Eine konkrete Abgrenzung der beiden Ansätze wird im Zuge des Kapitels 5.1.2.2 und des Anhangs A1.1 vorgenommen. Die asynchrone PSO weist zudem ein verbessertes Konvergenzverhalten auf (vgl. [RWL+15]), was als Vorteil bewertet werden kann. Ein weiterer Vorteil zeichnet sich dadurch aus, dass die Zykluszeitreduzierung nicht unterbrochen oder sogar abgebrochen wird, wenn eine Rechnerressource oder ein Rechnerkern ausfällt.

¹³⁰ Die Zeitdauern sind hierbei vertretbar, da diese im Idealfall wenige Sekunden bis wenige Minuten andauern.

5.1.2.2 Mehrphasiger Ansatz zur Werkstückpositionierung

Die Erweiterung der Metaheuristik PSO durch den gruppierten teil-asynchronen sowie den reinen asynchronen Ansatz in Verbindung mit der NC-Parser-Applikation dient in erster Linie dazu, die bereits schnellen Verfahrensiterationen auszunutzen. Die Partikelevaluation im Rahmen der Fitnessberechnung wird hierbei beschleunigt, und die Evaluation bzw. Fitnessberechnung der Partikelgruppen kann auf mehrere Rechnerressourcen verteilt werden. Da durch die NC-Parser-Applikation in kurzen Zeiteinheiten eine hohe Anzahl zu evaluierender Lösungskandidaten (Partikel), die zu reduzierten Zykluszeiten führen, vorliegt, ist die Kollisionsevaluation der Partikel (Aufspannkoordinaten) mithilfe der vWZM nach wie vor zeit- und rechenintensiv. Daher ist es im Sinne der Nutzerfreundlichkeit zielführend, den Fokus eher auf die Parallelisierung der Evaluation mittels vWZM zu legen und die zu überprüfenden Lösungskandidaten einzugrenzen, um eine effiziente Kollisionsprüfung zu erreichen. Die Abbildung 15 verdeutlicht beispielhaft für eine Iteration den dazu angestrebten (zeitlichen) Verfahrensablauf.

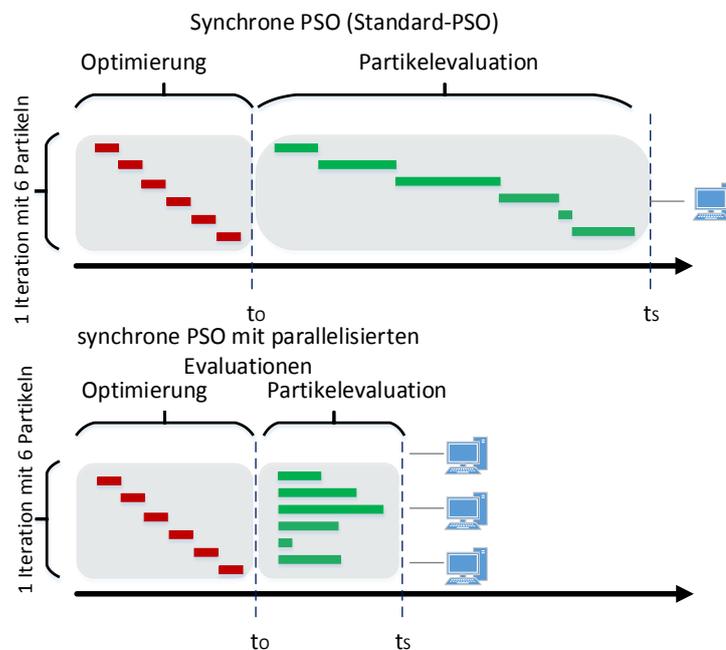


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Parallelisierung der Partikel-Evaluation bei der synchronen PSO

Der obere Bereich der Abbildung 15 beschreibt die Optimierungsprozesse, wie sie unter Standardanwendungen durchgeführt werden. Die Optimierung durch die PSO (rote Balken) verläuft synchron, und alle Lösungskandidaten werden in der Evaluationsschleife (grüne Balken, NC-Parser-Applikation) sukzessiv abgearbeitet, bevor die nächste Generation beginnt. Der untere Bereich verdeutlicht das Prinzip der auf mehrere Ressourcen verteilten Evaluierungsläufe des zwei-phasigen Ansatzes. Die Variablen t_0 und t_s markieren exemplarisch die Zeiten für die Optimierung und die Evaluation, wobei verdeutlicht wird, dass der parallelisierte Ansatz allgemein eine kürzere Gesamtzeit benötigt ($t_0 + t_s$).

Sequenzielle Evaluierung und parallele Evaluierung

Bei der sequenziellen Evaluierung (Fitnessberechnung) wird jeder Partikel über die Ansteuerung der NC-Parser-Applikation evaluiert. Dieser Prozess dauert so lange an, bis alle Partikel der gegenwärtigen Generation abgeschlossen evaluiert sind, sodass danach die nächste Iteration (nächste Generation) startet. Dadurch steht die Laufzeit in linearer Abhängigkeit der Generationsgröße. Sei dazu m die Generationsgröße und die Laufzeit für den Partikel p_i mit $f(p_i)$ gegeben, dann folgt die Gesamtlaufzeit:

$$O\left(\sum_{i=1}^m f(p_i)\right) \quad (5.22)$$

Bei der parallelen Evaluierung wird die nächste Partikelgeneration erst dann erstellt, wenn alle Partikel evaluiert werden, jedoch erfolgt die Evaluierung der einzelnen Partikel einer Generation parallel. Dies resultiert in einer Laufzeit abhängig von der maximalen NC-Parser-Applikation-Laufzeit. Sei die Generationsgröße m und die Laufzeit der NC-Parser-Applikation für Partikel p_i $f(p_i)$, dann folgt die Laufzeit:

$$O(\max\{f(p_i)\}) \quad (5.23)$$

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass diese Laufzeit nur dann gilt, wenn alle Partikel p_i parallelisiert werden können. Sollten z. B. nicht ausreichend Rechnerressourcen zur Verfügung stehen, verändert sich die Laufzeit im Mittel wie folgt, mit k als Anzahl verfügbarer CPU-Kerne.

$$O\left(\frac{1}{k} \sum_{i=1}^n f(p_i)\right) \quad (5.24)$$

Um dabei die Anzahl der notwendigen Simulationsläufe via virtueller Werkzeugmaschine geringer zu halten und gleichzeitig einen automatisierten Ablauf des gesamten Optimierungsprozesses zu gewährleisten, wird die Optimierungskomponente (PSO mit NC-Parser-Applikation), definiert als *1. Phase*, durch eine zusätzliche Kopplung an einen Clusteralgorithmus erweitert (definiert als *2. Phase*), bei der auch die anschließende Evaluierung durch die vWZM (*2. Phase*) erfolgt. Dabei sollen die Partikel zeitlich nach der Optimierung und Fitnessberechnung durch die NC-Parser-Applikation als potenzielle Lösungen in Cluster unterteilt werden, die separat die Evaluierung durch die vWZM durchlaufen. Der Suchraum entspricht dabei stets der Volumengröße des Arbeitsraums der Maschine.¹³¹

Allgemein formalisiert gilt für diesen Ansatz zunächst die Funktion

¹³¹ Dabei ist nicht davon auszugehen, dass die Maschine und damit auch das Maschinenmodell alle Positionen innerhalb des Arbeitsraumvolumens erreichen können.

$$f: \mathbb{R}^D \rightarrow \mathbb{R} \times \{0,1\} \quad (5.25)$$

die generell die Validität des Eingangsvektors in Form eines Fitnesswertes angibt. Dabei gibt $g: \mathbb{R}^D \rightarrow \mathbb{R}$ nur den Fitnesswert an, und die Funktion $h: \mathbb{R}^D \rightarrow \{0,1\}$ gibt nur die Validität wieder. Die Validität ergibt sich als kollisionsfreie Aufspannposition. Dabei wird streng angenommen, dass $t(g) < t(h)$ gilt, sodass zwei Phasen zustande kommen, die sequenziell ablaufen. Die erste Phase beinhaltet die Metaheuristik, hier die PSO, deren Lösungskandidaten durch die Fitnessberechnung durch die NC-Parser-Applikation vor-evaluiert werden. Der Fitnesswert ist die reduzierte Zykluszeit t_{ZN} (vgl. Gleichung 5.3), die sich aus dem NC-Programm ergibt. Als Lösungsmenge ergibt sich somit allgemein

$$X: \{(\zeta, b): \zeta \in \mathbb{R}^D, b \in \mathbb{R}, b = g(\zeta)\}. \quad (5.26)$$

In der zweiten Phase wird die Lösung als Datenmenge X dem Clustering-Verfahren unterzogen. Dabei sei k die Anzahl möglicher Rechnerressourcen.¹³² Dabei werden die Rechnerressourcen mit der Anzahl¹³³ der zur Verfügung stehenden Simulationsmodelle (Instanzen der vWZM), gleichgesetzt und sind damit auch die Anzahl der Cluster. Ferner sei $E := (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k)$, wobei $\varepsilon_i \subseteq X$ mit $\zeta \in \mathbb{R}^D$ und $b \in \mathbb{R}$ ist (vgl. Lösungsmenge in Gleichung 5.26). Es gilt: $b = g(\zeta)$ mit dem Eingabevektor ζ und ε_i seien geordnet nach b . Für die Anwendung des Clustering-Verfahrens repräsentiert X somit die einzelnen Eingabeparameter und k demnach die Anzahl der Cluster, was linear mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Rechnerressourcen zusammenhängt (vgl. [MWR+16]). Damit kann das in Kapitel 2.1 angedeutete Problem adressiert werden, dass Rechnerressourcen verteilt genutzt werden (vgl. SETI@home, [Hip16-ol], [Set16-ol]), wenn diese nachweislich nicht ausgenutzt werden. Auch können Ausfälle auf anderen Rechnerressourcen mit vorhandenen Maschineninstanzen eingedämmt werden.

Hierzu bietet der K-Means-Clusteralgorithmus (vgl. [ZaWa14] S. 333ff.) zunächst ein brauchbares Potenzial (vgl. [MWR+16]). Bei dem genannten Clustering-Verfahren enthält eine Menge von D -dimensionalen Punkten p_i sowie die gewünschte Anzahl an Cluster k als Eingangsgröße. Alle Punkte p_i werden einem Cluster zugeordnet. Dabei verhält sich der Algorithmus wie folgt:

Zufällige k Punkte werden als „Centroide“ c_1, c_2, \dots, c_k ausgewählt. Diese repräsentieren die Mittelpunkte der Cluster. Im Anschluss wird jeder Punkt genau dem Cluster zugeordnet, sodass dessen (euklidischer) Abstand zu dem entsprechenden Centroid minimal ist. Die Centroide werden danach als diejenigen Punkte im Cluster neu berechnet, sodass diese im Mittel den Abstand zu allen anderen Clusterpunkten minimieren. Der Punkt, der am dichtesten am tatsächlichen Mittelpunkt ist, wird aus der euklidischen Abstandsmetrik ermittelt. Anschließend werden erneut alle verbleibenden Punkte ihrem nächstgelegenen

¹³² Die Anzahl der Rechnerressourcen k ist auch als Anzahl der Cluster k zu verstehen, wenn davon ausgegangen wird, dass die Partikel pro Cluster auf eine Rechnerressource validiert werden, auf die jeweils eine vWZM bereitgestellt wird.

¹³³ Die Anzahl meint hier die Menge an gleichartigen Maschinen und wird losgelöst von einer Maschinenbelegung betrachtet.

Cluster zugewiesen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis sich die Centroide nicht mehr verändern. Der Pseudocode zu dem Algorithmus ist in Anhang A1.5, Pseudocode 3 dargestellt.

Bei dem zwei-phasigen Ansatz sei noch angemerkt, dass die nachfolgende Annahme beachtet wird:

***Annahme:** Die Lösungen, die einen geringen euklidischen Abstand zueinander haben, verhalten sich ähnlich.*

Die genannte Annahme besagt, dass, wenn ein Lösungskandidat (Aufspannvektor) als Lösungspunkt während der Simulation zu einer Kollision führt, ferner angenommen werden kann, dass der Lösungsvektor¹³⁴ (Lösungspunkt) in unmittelbarer Nähe (Nachbarschaft) des Clusters ebenfalls zu einer invaliden Aufspannposition führen wird.

Mit dem entwickelten Ansatz können somit parallel Simulationen durchgeführt werden, und der Arbeitsraum kann unter „Echtzeit-Fertigungssimulationsbedingungen“ mehrmals überprüft werden. Dabei sind simulationsseitig nur noch die Kollisionsinformationen relevant. Laufzeit bzw. Fertigungszeit spielt eine untergeordnete Rolle, da die abgeschätzte Fertigungszeit in Form der Zykluszeit bereits durch vorangegangene „Optimierungsphasen“ mittels Kopplung an die NC-Parser-Applikation minimiert (optimiert) wurde. Die einzigen Zeitunterschiede, die negativ in Form von längeren Durchlaufzeiten ins Gewicht fallen können, resultieren aus (mehrfach) veränderten Aufspannlagen des Werkstücks, die aber in Kauf genommen werden, wenn sie schlussendlich eine kollisionsfreie Fertigung ermöglichen.¹³⁵

Die unter 5.1.2.2 konzeptionell dargestellte 2-phasige Aufspanverbesserung (PSO und NC-Parser-Applikation als 1. Phase und Clustering-Verfahren und vWZM-Kopplung als 2. Phase) wird in den nachfolgenden Ausführungen **„Aufspanverfahren I“** genannt.¹³⁶ Für den Optimierungsansatz bei unterschiedlicher Konfiguration der Asynchronität des PSO-Algorithmus sei auf den Anhang A1.1 verwiesen: Der Ansatz ist als **„Aufspanverfahren II“** bezeichnet und wurde als theoretisches Konzept entwickelt. Eine praktische Umsetzung (Kapitel 6) erfolgt in dieser Arbeit nicht.

Schnittstellen und Ablauf der Werkstückpositionierung mittels mehrphasigen Ansatzes:

Die Ansteuerung der zwei-phasigen Positionsstrategie (sowohl Aufspanverfahren I als auch II) erfolgt durch eine Bedieneroberfläche (GUI) (vgl. Kapitel 6.1), durch die auch Fertigungsschritte (*Workflow*) verwaltet werden. Hier wird die Annahme getroffen, dass

¹³⁴ Hierbei können auch mehrere Lösungsvektoren in der Nachbarschaft des ungültigen Clusters liegen.

¹³⁵ Der schlechteste Fall führt dazu, dass alle zeitbesseren Lösungen zu ungewollten Kollisionen führen und die Initialaufspanparameter verwendet werden müssen, wenn diese vorab geprüft wurden und mindestens eine Kollisionsfreiheit (pro Koordinatenpaarung) festgestellt wurde. Sind die Initialaufspanparameter auch nicht kollisionsfrei, dann gibt es unter den Bedingungen keine gültige Lösung.

¹³⁶ Grundgleichungen des Verfahren für das Aufspanverfahren I ist mit ersten Versuchsergebnissen sind in [WeLa17] gezeigt.

jeder eingepflegte Fertigungsschritt ein Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Aufspannlage besitzt. Die Abbildung 16 stellt den verfolgten Ansatz der Werkstückpositionierung mit den zugehörigen Komponenten als Ablaufdiagramm dar.

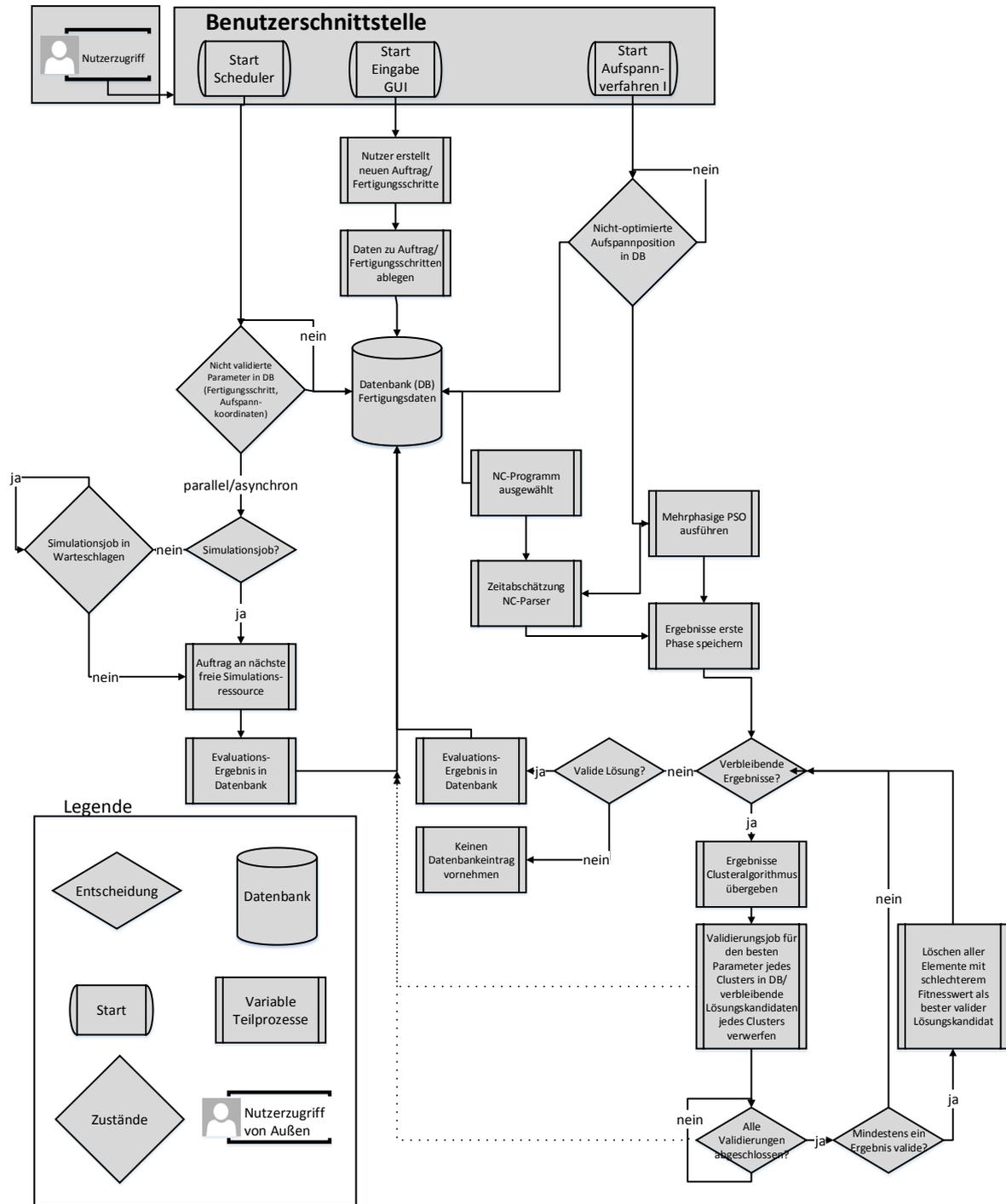


Abbildung 16: Gesamtablauf der zwei-phasigen Werkstückpositionierung

Wie in Abbildung 16 angedeutet, wird zur Realisierung der Parallelisierung der Evaluation ein *Scheduler* angesteuert, der Warteschleifen verwaltet und zu validierende Aufspannpositionsparameter in Form von *Simulationsjobs* an eine freie virtuelle Werkzeugmaschine (vWZM)¹³⁷ vergibt. Damit wird die Möglichkeit offengehalten, nicht belegte Rechnerressourcen zu nutzen. Dabei sind ferner zwei verschiedene Arten der Nutzung der virtuellen Werkzeugmaschine vorgesehen: die Validierung zur Durchführung des zwei-phasigen Aufspannverfahrens (insb. Aufspannverfahren I) und die Validierung durch „geratene“ (zufällige) Aufspannpositionen durch den Maschinenbediener. Dabei kann eine Priorisierung angegeben werden. Zur beschleunigten Ermittlung valider Aufspannpositionen und Einrichtparameter sollte das Aufspannverfahren I bevorzugt werden. Die direkte Anwahl der virtuellen Werkzeugmaschine dient der Eröffnung von Reaktionsmöglichkeiten bei unvorhersehbaren Auftragsänderungen.

5.1.2.3 Erweiterung des Ansatzes zur Überprüfung und Verbesserung der Werkstückpositionierung

Die Überprüfung und Verbesserung der Aufspannkoordinaten des Werkstücks kann unter mehreren Einstellmöglichkeiten erfolgen, um die Zykluszeit zu reduzieren, und sogar die Zielsetzung beinhalten, unterschiedliche Achsgeschwindigkeiten zu berücksichtigen. Dazu wird der nachfolgende Ansatz als Ergänzung verfolgt.

Die Relativbewegungen, die bei der Bearbeitung eines Werkstücks durch das Werkzeug unter der Ausführung von NC-Befehlen auftreten, folgen allgemein der Annahme, dass das Werkzeug (Fräser) einer definierten Bahnkurve (ermittelt durch Inhalte des NC-Programms) folgt. Dabei werden insbesondere die Wegbefehle des G-Codes, wie in Tabelle 7 angegeben, als Ausgangslage betrachtet. Wenn keine Angaben im aktuellen NC-Satz zu den jeweiligen $F[Zahl]$ ¹³⁸-Parametern vorliegen, obwohl diese notwendig sind, dann gelten die Angaben aus dem nächstzurückliegenden NC-Satz, in dem die $F[Zahl]$ -Definition zuletzt erscheint.

Tabelle 7: Relevante Fahrbefehle in G-Code

Fahrbefehl	Bedeutung und Geschwindigkeit
G0	Eilgang, keine Angabe der Vorschubgeschwindigkeit $F[Zahl]$ notwendig
G1	Lineare Interpolation, Angabe von $F[Zahl]$ notwendig, sonst vorherige
G2	Kreisinterpolation im Uhrzeigersinn, Angabe von $F[Zahl]$ notwendig
G3	Kreisinterpolation gegen Uhrzeigersinn, Angabe von $F[Zahl]$ notwendig

¹³⁷ Eine Verteilung auf dritte Rechner zur Nutzung dieser Ressourcen ist noch nicht praktisch umgesetzt. Die Maschineninstanzen sind in einem Demonstrator-Netzwerk angelegt, welches aber mit einem regulären Netzwerk vergleichbar ist.

¹³⁸ $F[Zahl]$ gibt hier Vorschübe als numerischen Wert wieder, wobei $[Zahl]$ als Platzhalter zu verstehen ist. Diese Bezeichnung ist an die NC-Satznomenklatur nach DIN 66025 angelehnt (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 3).

Zur Vereinfachung wird in den nachfolgenden Ausführungen nur zwischen $G0[Zahl]$ und $F[Zahl]$ unterschieden, da G1, G2 und G3 zwingend immer eine $F[Zahl]$ -Angabe benötigen (bzw. die vorherige gilt, wenn keine neue Angabe gemacht wurde), der Befehl $G0[Zahl]$ jedoch fest programmiert aus den Maschineneigenschaften resultiert.¹³⁹ Der betrachtete Bahn-Punkt zur Orientierung ist hierbei die Werkzeugspitze, von der die Koordinatenzählung des Werkzeugs in der NC-Umgebung ausgeht, und nicht, wie im klassischen Fall der Physik/Mechanik, „die räumliche Bewegung von Punkten“ (vgl. [Mah10]), bei der der betrachtete Punkt stets der Körperschwerpunkt des betrachteten Körpers ist. Die NC-Parser-Applikation beinhaltet die Ausgabedaten der einzelnen zurückgelegten Wege des Werkzeugs pro NC-Befehl, die automatisiert extrahiert werden können. Für jeden NC-Satz gilt somit für die x -, y - und z -Achse:

$$\Delta S_x = s_{x,NC} - s_{x,NC-1} \quad (5.27)$$

$$\Delta S_y = s_{y,NC} - s_{y,NC-1} \quad (5.28)$$

$$\Delta S_z = s_{z,NC} - s_{z,NC-1} \quad (5.29)$$

Der resultierende Vektor für die Wegbeschreibung für die NC-Sätze ergibt sich jeweils aus dem Betrag der oben genannten Gleichung 5.27 bis 5.29:

$$s_{res} = \sqrt{(\Delta S_x)^2 + (\Delta S_y)^2 + (\Delta S_z)^2} = |s_{res}| \quad (5.30)$$

$$S_{gesamt}^{kum} = \sqrt{(S_x^{kum})^2 + (S_y^{kum})^2 + (S_z^{kum})^2} = |S_{gesamt}^{kum}| \quad (5.31)$$

Der Betrag für die resultierende Geschwindigkeit der NC-Sätze $v_{res} = const.$ ist aus dem NC-Programm ebenfalls extrahierbar und kann entweder unter der Kennung $F[Zahl]$ oder aus dem Eilgang, der den NC-Befehl $G0[Zahl]$ beinhaltet, entnommen werden, sodass hier zwei Typen unterschiedlicher resultierender Geschwindigkeiten vorliegen, deren Unterschiede wesentliche Auswirkung auf die Datenauswertung haben. Die resultierende Geschwindigkeit gilt für jeden Satz n_T im NC-Programm, mindestens jedoch so lange, bis der NC-Befehl überschrieben wird.¹⁴⁰ Die Beträge hinter den NC-Befehlen $F[Zahl]$ sowie $G0[Zahl]$ können identisch oder auch unterschiedlich sein, je nach Konfiguration und Voreinstellung des NC-Programms. Theoretisch kann jede Zeile eines NC-Programms einen neudefinierten Befehl $F[Zahl]$ ¹⁴¹ beinhalten, jedoch ist der Befehl für den Eilgang $G0[Zahl]$ für jede Maschine fest programmiert. Somit ist jedem NC-Satz min-

¹³⁹ Für $G0[Zahl]$ ist der Platzhalter für die Eilganggeschwindigkeit in [m/s] der betrachteten Werkzeugmaschine.

¹⁴⁰ NC-Befehle sind in der Regel modal, sodass die Befehle für den Vorschub allgemein so lange gelten, bis sie wieder überschrieben werden.

¹⁴¹ $F[Zahl]$ ist frei programmierbar.

destens eine resultierende Geschwindigkeit zugeordnet, maximal jedoch l viele (in Abhängigkeit von der Anzahl an NC-Befehlen bzw. NC-Sätze), sodass gilt $l \leq n_T$. In der realen Fertigung kann davon ausgegangen werden, dass die Eilganggeschwindigkeit $G0[Zahl]$ einen höheren Betrag aufweist als die nutzerkonfigurierte Geschwindigkeitsangabe $F[Zahl]$ für die übrigen G-Befehle.

Durch datenverarbeitende Methoden können aus dem NC-Programm die kumulierten Häufigkeiten der einzelnen Wege, die das Werkzeug für die jeweiligen x -, y - und z -Achsen zurücklegt, für jede resultierende Geschwindigkeit extrahiert werden. Dazu werden die Wegdatenpunkte der zugrunde liegenden Geschwindigkeit $F[Zahl]$ und $G0[Zahl]$ zugeordnet und in die kartesischen Koordinaten aufgeteilt. Eine Übersicht über die daraus abgeleiteten Maschinenwege ist Tabelle 8 zu entnehmen:

Tabelle 8: Übersicht über die kumulierten Maschinenwege, bezogen auf den Programmnullpunkt in kartesischen Koordinaten

	$G0[Zahl]$ Eilgang, kumulierte Werte	$F[Zahl]$ – absoluter Vorschub, kumulierte Werte aus G1, G2 und G3
$S_x^{kum} = \sum_{N=1}^N \Delta S_x$	$\Delta S_{x,N_{NC},G0}$	$\Delta S_{x,N_{NC},F}$
$S_y^{kum} = \sum_{N=1}^N \Delta S_y$	$\Delta S_{y,N_{NC},G0}$	$\Delta S_{y,N_{NC},F}$
$S_z^{kum} = \sum_{N=1}^N \Delta S_z$	$\Delta S_{z,N_{NC},G0}$	$\Delta S_{z,N_{NC},F}$

Dadurch, dass für jeden NC-Satz n_T eine spezifische konstante Vorschubgeschwindigkeit ($F[Zahl]$ oder $G0[Zahl]$) gilt, die als resultierende Geschwindigkeit v_{res} definiert ist und sich aus v_x , v_y und v_z durch die vektorielle Betragsformel

$$v_{res} = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2 + (v_z)^2} = |v_{res}| \quad (5.32)$$

zusammensetzt, kann abgeleitet werden, dass der Anteil der aufzubringenden Achs-Geschwindigkeit zum Erreichen der Zielkoordinaten der Maschine proportional mit der Höhe der kumulierten zurückgelegten Wege zum Erreichen der Zielkoordinaten zusammenhängt. Der formale Zusammenhang ergibt sich aus der ersten Ableitung der Wegstrecke nach der Zeit:

$$v = \dot{s} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (5.33)$$

wobei für jeden NC-Satz n_T gilt $\Delta t = \frac{S_{res}^{N_{NC}}}{F[Zahl]}$ bzw. bei G0 $\Delta t = \frac{S_{res}^{N_{NC}}}{G0[Zahl]}$ und für Δs der Betrag $|\Delta s|$ eingesetzt wird. Somit können ergänzend zu der Tabelle 8 die jeweiligen Zeitintervalle $\Delta t_{F[Zahl]}^{N_{NC}}$ bzw. $\Delta t_{G0[Zahl]}^{N_{NC}}$ ermittelt werden, um anhand der kumulierten Wege der jeweiligen Koordinatenrichtung die Geschwindigkeitskomponenten für die x -, y - und z -Achse zu ermitteln.

Durch die Drehung des Werkstücks auf dem Maschinentisch können durch die aufgezeigten Zusammenhänge die Anteile der Geschwindigkeiten der einzelnen Achsen, insb. für die Auflagekoordinaten x und y , unter konstanter resultierender Geschwindigkeit variieren und auch hinsichtlich definierter Ziele optimiert werden. Dies würde eine gesteuerte Achsbelastung ermöglichen und die Aufspannsituation, durch alternative Achsbelastungen, verbessern. Dazu wird vorausgesetzt, dass sich die globalen Maschinenwege der einzelnen Achsen durch die Rotation (Orientierungsänderung) ebenfalls verändern. Die Beträge der Strecken innerhalb des NC-Programms, ausgehend vom Programmnullpunkt, bleiben konstant. Aus der Perspektive des Werkzeugwechsellpunkts oder des Eingriffspunkts aus dem Satz n_T-1 sowie auch aus der Perspektive des Maschinennullpunkts kann die Orientierungsänderung ausschlaggebend für umständliche verlängerte Werkzeugwege sowie deren Vermeidung sein. Daraus kann auch ein höherer bzw. veränderter Energieaufwand resultieren, um die Achsgeschwindigkeiten in einem endlichen Zeitintervall¹⁴² für die resultierende Geschwindigkeit, die vom NC-Programm maßgeblich gefordert wird, zu erreichen und zu halten.

Durch dieses Vorgehen besteht die Chance, unnötige (steuerungsbedingte) Tischdrehungen (die an eine kinematische Achse gekoppelt sind) zu verringern und damit die Relativbewegungen der Achsen zueinander zu minimieren oder im umgekehrten Fall eine Tischrotation durch die Steuerung hervorzurufen, die die Werkzeugwege durch geschicktes Drehen verringert. Die Abbildung 17 verdeutlicht das Prinzip der Tischrotation. Der Koordinatenursprung verdeutlicht exemplarisch einen Referenzpunkt P_{M0} als Maschinennullpunkt, Werkzeugwechsellpunkt oder als Eingriffspunkt in einer verschiedenen oder identischen z -Ebene aus dem Satz n_T-1 . Der Koordinatenursprung P_{NCO} stellt den Programmnullpunkt dar. W_{P1} repräsentiert den Eingriffspunkt im Standardfall, und W_{P2} definiert eine durch eine Werkstückdrehung oder ein verändertes Umspannen resultierte Position. Die Werkzeugwege sind vektorieLL eingetragen und durch S_{res1} , S_{x1} und S_{y1} respektive für die Drehung mit S_{res2} , S_{y1} und S_{y2} gekennzeichnet. Innerhalb des NC-Programms, ausgehend vom Programmnullpunkt, ist keine unterschiedliche Wegmessung zu erkennen, sodass die resultierende $S_{res1} = S_{res2}$ gilt, da der zurückgelegte Weg konstant ist. Interessant sind die veränderten Teilwegeänderungen sowie die resultierenden Wege, ausgehend vom Maschinennullpunkt bzw. einer Werkzeugwechselkoordinate (abhängig vom Szenario). Bezüglich des Gesamtwegs (vgl. Abbildung 17) – ausgehend von n_T-1 oder vom Werkzeugwechsellpunkt – sollte es sich um die vorangegangene Operation im vorangegangenen oder gleichen NC-Satz handeln, ist hier beispielhaft zu erkennen, dass

¹⁴² Das Zeitintervall umfasst hier die Eingriffszeit für den NC-Satz n_T .

sich der Weganteil in die x -Richtung tendenziell erhöht ($S_{x1}' < S_{x2}'$). Die Anteile auf der y -Achse haben sich äquivalent ebenfalls verändert: ($S_{y1}' > S_{y2}'$). Die veränderten Koordinaten, ausgehend vom Maschinenkoordinatensystem, und der damit veränderte absolute Wegmessung können über die nachfolgenden Gleichungen 5.34 und 5.35 errechnet werden:¹⁴³

$$x_2^* = x_1^* \cdot \cos \alpha - y_1^* \sin \alpha \quad (5.3534)$$

$$y_2^* = x_1^* \cdot \sin \alpha + y_1^* \cos \alpha \quad (5.3635)$$

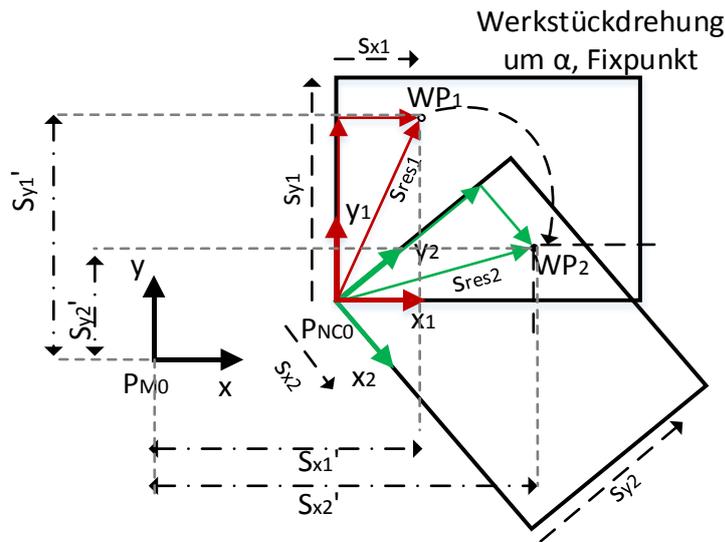


Abbildung 17: Schematische Darstellung der Werkstückdrehungen um den Koordinatenursprung

Der oben geschilderte Fall bezieht sich nur auf die Situation, wenn um den eigentlichen Ursprung gedreht wird. In der Simulationslandschaft und bei der Modellentwicklung wird aus Nutzersicht die Drehkoordinate in der Bauteilmitte oder in der Auflagefläche definiert, sodass das Werkstück um die z -Achse punktsymmetrisch verdreht (Orientierungsänderung) wird. Prinzipiell gelten hierbei die Regeln für die Drehung um einen beliebigen Punkt. Die Koordinatentransformation ergibt sich in diesem Fall wie folgt:¹⁴⁴

$$x_2^* = x_M + (x_1^* - x_M) \cdot \cos \alpha - (y_1^* - y_M) \sin \alpha \quad (5.36)$$

$$y_2^* = y_M + (x_1^* - x_M) \cdot \sin \alpha + (y_1^* - y_M) \cos \alpha \quad (5.37)$$

¹⁴³ Die Gleichungen 5.34 und 5.35 sind für die negative mathematische Zählrichtung angegeben, exemplarisch zur Darstellung aus Abbildung 17. Allgemein müssen die Gleichungen entsprechend des Drehsinns angepasst werden. Gleiches ist auch für die Gleichungen 5.36 und 5.37 zu beachten.

¹⁴⁴ Die notwendigen Rechenoperationen hierfür ergeben die Vorgehensregeln:

- Koordinatenverschiebung bis zum Drehpunkt/Mittelpunkt (neues Koordinatensystem)
- Drehung um den Drehpunkt/Mittelpunkt (Ursprung des neuen Koordinatensystems)
- Rücktranslation

$$P = \vec{F} * \vec{v} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_x * a_x \\ m_y * a_y \\ m_z * a_z \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}. \quad (5.39)$$

Die kinetische Energie ist wie folgt definiert:

$$E_{kin} = \frac{m}{2} * v^2 = \frac{m}{2} (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2). \quad (5.40)$$

Die Arbeit ist demnach:

$$W = m * a * S_{gesamt}^{kum} = \begin{pmatrix} m_x * a_x \\ m_y * a_y \\ m_z * a_z \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} S_x^{kum} \\ S_y^{kum} \\ S_z^{kum} \end{pmatrix}. \quad (5.41)$$

Zu berücksichtigen ist bei dem Ansatz, dass nicht allein die Geschwindigkeit maximiert wird, um die Werkzeugwege in geringerer Zeit zu verarbeiten, sondern eine mögliche Neuverteilung der Achsbelastung der Maschine durch die Neuverteilung der Anteile der Werkzeugwege und Geschwindigkeiten stattfindet. Dazu ist der Koeffizient $\frac{S_{gesamt}^{kum}}{t_{ZN}}$, der den Zusammenhang $v = \Delta s / \Delta t$ darstellt, von entscheidender Bedeutung, da damit die Entwicklung von P hergeleitet werden kann, wenn die Entwicklung von S_{gesamt}^{kum} und t_{ZN} im Zusammenhang mit der Aufspannorientierung θ sowie den Aufspannkoordinaten x, y und z betrachtet wird. Demnach wird für v der Quotient $\frac{\Delta S_{gesamt}^{kum}}{\Delta t_{ZN}}$ eingesetzt. Die Parameter für m und a beziehen sich auf die Maschinenrüstung¹⁴⁷ und -parameter¹⁴⁸ und tragen zur Entscheidungsunterstützung bei, wenn es darum geht, Achswege zu präferieren, z. B. wenn der Maschinentisch während der Fertigung in geringerem Maße bewegt werden soll, was sich auf die Konstante m_x und damit auf S_x^{kum} als Teil von S_{gesamt}^{kum} bezieht.¹⁴⁹

Fallunterscheidungen aus der Entwicklung von EZZ_{NC} und S_{gesamt}^{kum} :

Durch den allgemeinen Zusammenhang $v = \Delta s / \Delta t$ und die Konsequenz, dass sich für die Beurteilung und Entwicklung von P für v , ausgehend von v_{res} , eine Abhängigkeit von S_{gesamt}^{kum} , t_{ZN} und Aufspannorientierung θ ergibt, sind folgende Fälle zu beachten.¹⁵⁰

- I) $\Delta S_{gesamt}^{kum} = S_{gesamt}^{kum}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}) - S_{gesamt}^{kum}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) < 0$
- II) $\Delta S_{gesamt}^{kum} = S_{gesamt}^{kum}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}) - S_{gesamt}^{kum}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) > 0$
- III) $\Delta S_{gesamt}^{kum} = S_{gesamt}^{kum}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}) - S_{gesamt}^{kum}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) = 0$
- IV) $\Delta t_{ZN} = t_{ZN}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}) - t_{ZN}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) < 0$
- V) $\Delta t_{ZN} = t_{ZN}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}) - t_{ZN}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) > 0$

¹⁴⁷ Die Masse m variiert mit den Werkzeugen und Vorrichtungen der Maschine.

¹⁴⁸ Darunter ist die Achsbeschleunigung a subsumierbar.

¹⁴⁹ Sollte die Maschinenachse für die Tischbewegung die x-Achse betreffen.

¹⁵⁰ Die Fallunterscheidung betrachtet jeweils S_{gesamt}^{kum} bei $t_{ZN} = \text{const.}$ sowie t_{ZN} bei $S_{gesamt}^{kum} = \text{const.}$

$$\text{VI) } \Delta t_{ZN} = t_{ZN}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}) - t_{ZN}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) = 0$$

Wenn die Paarungen I, II, mit IV und V in Gleichung 5.38 oder 5.39 für $v = \Delta s / \Delta t$ eingesetzt werden, dann ergeben sich ausgehend vom Initialzustand die folgenden Auswirkungen:

I und IV: $P < 0$

II und V: $P > 0$

III: $P = 0$, wodurch auch W den Wert 0 annimmt.

VI: P ist nicht definiert bei nicht definiertem Quotienten $\frac{S_{gesamt}^{kum}}{\Delta t_{ZN}}$ bzw. würde unendlich werden, wenn gilt $\lim_{\Delta t_{ZN} \rightarrow 0} \frac{S_{gesamt}^{kum}}{\Delta t_{ZN}}$.¹⁵¹

I und II bieten eine weitere praktische anwendbare Bewertung für W (vgl. Gleichung 5.41), da $W < 0$ für I und $W > 0$ für II gilt. Wenn $\Delta t_{ZN} = 0$ sein sollte, dann heißt das, dass die Aufspannposition keine Verbesserung (oder Verschlechterung) von t_{ZN} mit sich bringt und damit die Initialaufspannung gilt.

Eine weitere Fallbetrachtung sei die Entwicklung von ΔP in Abhängigkeit von $|\Delta S_{gesamt}^{kum}|$ und $|t_{ZN}|$, wenn diese Parameter nur das Veränderungsverhältnis zwischen zwei Positionen und/oder Aufspannorientierungen abbilden und damit nur die Entwicklungstendenz von P zeigen:

$$|\Delta S_{gesamt, neu-initial}^{kum}| = \left| \frac{(S_{gesamt}^{kum}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) - S_{gesamt}^{kum}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}))}{S_{gesamt}^{kum}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial})} \right|$$

$$|\Delta t_{ZN, neu-initial}| = \left| \frac{(t_{ZN}(\theta_{neu}, (x, y, z)_{neu}) - t_{ZN}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial}))}{t_{ZN}(\theta_{initial}, (x, y, z)_{initial})} \right|$$

$$\text{VII) } |\Delta S_{gesamt, neu-initial}^{kum}| > |\Delta t_{ZN, neu-initial}|$$

$$\text{VIII) } |\Delta S_{gesamt, neu-initial}^{kum}| < |\Delta t_{ZN, neu-initial}|$$

$$\text{IX) } |\Delta S_{gesamt, neu-initial}^{kum}| = |\Delta t_{ZN, neu-initial}|$$

Aus dem Fall VII folgt ein steigender Wert für P (in der Tendenz), aus VIII folgt ein sinkender Wert für P (in der Tendenz), und aus IX folgt keine Veränderung der Tendenz für P .

Ein NC-Programm kann gemischte bzw. unterschiedliche Geschwindigkeitsgrößen beinhalten. Das heißt, es können Geschwindigkeitsangaben von $F[Zahl]_1 \dots F[Zahl]_n$ vorliegen sowie $G0_m$ Eilgangbefehle auftreten. Dazu kann die absolute Häufigkeit der Befehle für $F[Zahl]$, hier $H_{F[Zahl]}$, und $G0[Zahl]$, hier definiert als H_{G0} , ermittelt werden. Hierbei ist eine Priorisierung anhand einer Fallunterscheidung empfehlenswert, die von der angestrebten Zielauslastung der jeweiligen Achse abgeleitet ist. Für die Fallunterscheidung wird immer der Betrag von $F[Zahl]$ herangezogen, der den maximalen Betrag ausbildet.

¹⁵¹ Die Grenzwertannäherung von rechts (+) oder links (-) wurde nicht weiter unterschieden.

Dazu gelten die folgenden Regeln:

Wenn gilt:

$G0[Zahl] \geq F[Zahl]_{höchster} \wedge H_{G0} \geq H_{F[Zahl]}$, dann wird die Achsgeschwindigkeitsauslastung auf Basis von G0 ausgeführt.

Sei $G0[Zahl] \geq F[Zahl]_{höchster} \wedge H_{G0} < H_{F[Zahl]}$, dann wird die Achsgeschwindigkeitsauslastung auf Basis von $F[Zahl]$ ausgeführt.

Wenn $G0[Zahl] < F[Zahl]_{höchster} \wedge H_{G0} \geq H_{F[Zahl]}$, dann wird die Achsgeschwindigkeitsauslastung auf Basis von G0 ausgeführt.

Wenn $G0[Zahl] < F[Zahl]_{höchster} \wedge H_{G0} < H_{F[Zahl]}$, wird die Achsgeschwindigkeitsauslastung auf Basis von $F[Zahl]$ ausgeführt.

Sollte ein NC-Programm mehr als einen Wegbefehl beinhalten und diese Wegbefehle den Achsvorschub mit ungleichen Geschwindigkeiten $F[Zahl]$ definieren, dann wird für die oben stehenden Bedingungen der Wert $F[Zahl]$ zugrunde gelegt, dem die maximale kumulierte Wegstrecke S_x^{kum} , S_y^{kum} , S_z^{kum} der jeweiligen Achsen zugeordnet werden kann.

Die hier dargelegten Grundregeln sind je nach Zieldefinition individuell konfigurierbar und hängen unter Umständen von unterschiedlichen Antriebsleistungen¹⁵², Beschleunigungen, Achslasten oder ähnlichen Maschinenrandbedingungen ab. Dies muss im Einzelfall anhand des Simulationsmodells, das die reale Maschine abbildet, bewertet werden, sollte dies technisch möglich sein. Ein Bewertungskriterium ist die Überprüfung der notwendigen Achsantriebsleistung für das kontinuierliche Verfahren der einzelnen Achsen mit der anteiligen Geschwindigkeits- und Wegstreckenbelastung auf Basis des NC-Programms. Ein mögliches Ziel kann z. B. sein, dass die Achsen vermehrt bewegt werden sollen, die eine geringe Antriebsleistung benötigen bzw. eine geringere kinetische Energie aufweisen. Das NC-Programm sowie die Aufspannlage des Werkstücks sind automatisch entsprechend anzupassen.

5.1.3 Kritische Bewertung und Grenzen der Werkstückpositionierung

Der Ansatz der Werkstückpositionierung identifiziert kollisionsfreie Aufspannkoordinaten für Werkstücke und Spannmittel, die sich maschinell weiterverarbeiten lassen. Der Ansatz ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn die Werkstücke durch maschinelle Hilfe (Positionierung durch Greifarm/Roboter) angeordnet werden. Der Roboter¹⁵³ kann die Koordinaten mit einer hohen Genauigkeit durch vorangegangenes Ausmessen des Ar-

¹⁵² Unterschiedliche Antriebsleistungen können bei Maschinen auftreten, deren Spindeln und Achsen mit unterschiedlichen Antriebskonzepten ausgestattet sind.

¹⁵³ Die Positionierung von Werkstücken in dem Maschinenarbeitsraum mithilfe eines Industrieroboters ist in der praktischen Anwendung bereits bekannt.

beitsraums verarbeiten. Der Werker hingegen wird die Positionierung durch die gegebenen Koordinaten ungenauer¹⁵⁴ durchführen, sollte keine aufwendige Messung erfolgen. Das Potenzial des Ansatzes liegt zudem vermehrt in der automatisierten, rechnergestützten Verarbeitung, ohne dass der Werker die Simulationsdurchläufe selbst durchführen oder auf eine aufwendige statistische Versuchsplanung zurückgreifen muss. Jedoch führen die Koordinaten nicht zwangsläufig zu einem zeitoptimalen Zykluszeitergebnis, sondern es findet eine Reduzierung der Zykluszeit statt.¹⁵⁵

Das entwickelte Verfahren zur Werkstückpositionierung bezieht sich zunächst auf einen definierten Fertigungsauftrag bzw. ein NC-Programm, seltener auf verschiedene aufeinanderfolgende NC-Programme (z. B. für das Umspannen und Bearbeiten mehrerer Seiten eines Werkstücks). Bei mehreren NC-Programmen ist es wegen der Gestaltung der vWZM notwendig, dass die einzelnen NC-Programme in verschiedene *Sessions* gespeichert werden und damit keine direkte Verknüpfung untereinander besteht (Insellösung). Problematisch wird die praktische Verwendung der durch das Aufspannverfahren I identifizierten Werkstückpositionskoordinaten, wenn die Aufspannung mithilfe eines fixierten hydraulischen Spannbocks als Spannmittel erfolgt wie bei dem Werkstückmodell A (vgl. Kapitel 6.2.2, Abbildung 46). Es ist aus arbeitstechnischer Sicht aufwendig, den Spannbock an die verschiedenen Positionskoordinaten anzupassen, sollte hierbei eine Verschraubung auf dem Maschinentisch erforderlich sein. Zudem ist zu beachten, dass die Zuleitung für das Hydraulik-Fluid nicht die Fertigung gefährden darf, wodurch auch die Reichweite (Schlauchlänge) gehemmt wird. Einige Ausführungen des Spannbocks ermöglichen eine translatorische Verschiebung, ohne die Verschraubungen zu lösen. Die hier dargelegten Konzepte und die Ergebnisse in Kapitel 6 lassen den Schluss zu, dass der Spannbock in die Achsenrichtung ausgerichtet werden sollte, die das höchste Positionierungspotenzial bietet (höchste Achsbewegungsrichtung), sodass eine translatorische Verschiebung/Anpassung ermöglicht wird. Zudem werden die eigentlichen Spannnuten, insb. ihre Positionen, für die Spannmittel nicht weiter berücksichtigt, was impliziert, dass das Werkstück „freiflächig“ aufgespannt werden kann, was in der Praxis dennoch vom Spannmittel (Reichweite der Befestigung und der Spannfläche) selbst und der Spannnutenposition abhängt. Die vWZM berücksichtigt die Spannnuten ebenfalls nicht.

Das Aufspannverfahren II (vgl. Anhang A1.1) wird hier nicht weiter vertieft, da keine schlechteren oder besseren Werkstückpositionsergebnisse im Vergleich zum Aufspannverfahren I zu erwarten sind. Vielmehr sind Fitnessberechnungen oder Evaluierungen mit dem Ansatz des Verfahrens II parallelisierbar, jedoch mit der Inkaufnahme von Informationsverlusten verbunden. Zudem besteht die Gefahr, dass durch gruppierte asynchrone Optimierungsläufe keine validen Lösungen (Kollisionsfreiheit) gefunden werden, ohne die Zykluszeit nennenswert zu verringern.

¹⁵⁴ Der menschliche Werker ist in der Lage, die Werkstücke zentimetergenau bzw. millimetergenau (hoher Aufwand) durch vorangehendes Messen zu positionieren – Messvorgänge nehmen jedoch Zeit in Anspruch, sodass dieses Vorgehen ab einem gewissen Grad unpraktisch wird.

¹⁵⁵ Die kollisionsfreie Fertigung ist in der heutigen Fertigung das allgemeingültige Absicherungsziel.

5.1.4 Gütekriterien zur Beurteilung der Aufspannsituation und Auswirkung auf das NC-Programm

Die Gütekriterien¹⁵⁶, nach denen die NC-Programme durch die Überprüfung des hier dargestellten Aufspannverfahrens I definiert werden, sind nachfolgend aufgezählt. Der Fokus liegt insgesamt auf der zeitlichen Verbesserung und Validität der Werkstückposition. Die Liste kann beliebig fortgesetzt werden, jedoch muss dabei gewährleistet werden, dass die Kriterien zweifelsfrei messbar sind und einen sinnvollen Beitrag für eine Bewertung bieten.

1. **Anzahl valider zykluszeitreduzierender Positionsparameter:** Anzahl der verfügbaren Aufspannparameter innerhalb eines definierten Prüfintervalls, die unmittelbar zu validen Lösungen führen und eine, verglichen mit der Initialaufspannung, reduzierte Zykluszeit enthalten.

Hierbei wird die Anzahl der zur Verfügung stehenden Koordinaten für die Werkstückposition ermittelt, die eine kollisionsfreie Fertigung mit sich bringen und eine geringere Zykluszeit aufweisen als die Initialposition. Das Prüfintervall beinhaltet die Zeitdauer oder die Anzahl der Durchläufe des Aufspannverfahrens. Zu berücksichtigen ist hierbei der Vergleich innerhalb einer Cluster-Konfiguration.

2. **Anzahl der Simulationsläufe (Kollisionsprüfungen):** Anzahl der notwendigen Simulationsläufe bis zum Erreichen einer validen Lösung eines Aufspannverfahren-Durchlaufs.

Nach Identifikation zu überprüfender Cluster ist unter Angabe der bereitgestellten Maschineninstanzen (Clusteranzahl) die Anzahl der absoluten Simulationsdurchläufe ermittelbar, bis eine valide Lösung identifiziert wurde. Je höher die Anzahl notwendiger Simulationsdurchläufe, desto mehr Rechnerressourcen sind gebunden und desto zeitaufwendiger ist die Werkstückpositionierung.

3. **Anzahl der Cluster:** Anzahl der Cluster und damit verbunden Anzahl der verwendeten Simulationsmodelle.

Je höher die Clusteranzahl, desto mehr Koordinatenvorschläge stehen gleichzeitig zur Verfügung, die potenziell zu validen Lösungen führen können. Die Zykluszeiten der Koordinaten der einzelnen Cluster müssen untereinander nicht identisch sein, jedoch müssen die identifizierten Zeiten mindestens geringer als die Zykluszeit, ausgehend von der Initialaufspannung, sein.

4. **Veränderungen der NC-Sätze:** Anzahl und Umfang der zu ändernden steuerungsspezifischen NC-Sätze für die veränderte Aufspannposition.

Die Anzahl der Änderungsvorgänge bei bestimmten steuerungsspezifischen Zyklen im NC-Programm sowie die Anzahl einzufügender (oder zu löschender) NC-Befehle zur NC-Programmanpassung lassen Rückschlüsse auf die Komplexität

¹⁵⁶ Ein Gütekriterium „dient zur Beurteilung der Qualität [von] Daten [...] oder der Qualität von Analyseergebnissen“ (vgl. [Gab16-01]). Diese Kriterien müssen objektiv sein, eine Reliabilität aufweisen (bei Wiederholung übereinstimmen) und valide sein (Übereinstimmung mit subjektiver Einschätzung durch Experten) (vgl. [Gab16-01]).

des NC-Programms zu und geben eine Bewertungsgrundlage für die Aufwandsabschätzung zur NC-Programmanpassung bzw. zur Kompatibilität des NC-Programms mit dem Aufspannverfahren I.

5.2 Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkzeugpositionierung

5.2.1 Modellierung und Annahmen zum Werkzeugmagazin

Das Werkzeugmagazin beinhaltet als Attribute Speicherplätze für diverse Werkzeuge und eine Kapazität, die nicht überschritten werden kann. Zur verbesserten Datenverarbeitung ist eine Modellierung des Magazins und der Werkzeuge geschaffen, um die Entwicklungsarbeiten für das Modell gedanklich zu vereinfachen. Die einzupflegenden Werkzeuge erhalten neben einer *Index-id* eine Größe bzw. Angabe zur quantitativen Speicherplatzvergabe im Magazin sowie eine Angabe zur „Lebensdauer“ (i. d. R. Standzeit). Die Werkzeuge, die (vorübergehend) nicht in das Magazin aufgenommen werden, werden in einer Zwischenablage verbucht (Werkzeuglager). In der Praxis ist dies üblicherweise ein Werkzeugschrank oder einer Ablage in der Nähe der Werkzeugmaschine. Formell wird das oben Angedeutete als erster Ansatz wie folgt beschrieben:

Das Werkzeug enthält die folgenden Informationen:

$$tool: (id, tool_life, size) \quad (5.42)$$

$$T_w = \{(id, tool_life, size) \in (\mathbb{N}, [0,1], \mathbb{N}) \mid tool \text{ mit Nummer „id“ ist verfügbar}\} \quad (5.43)$$

Die Anordnung im Magazin kann wie folgt dargestellt werden:

$$M \in T^{w_{kap}} \times \mathbb{N} = (\tau_n, \tau_3, \tau_2, \dots, \tau_j, \tau_i, \dots, \tau_7, \tau_m, w_j) \quad (5.44)$$

wobei $\tau_j = tool$ mit $id \ j$ ist.

Die verbleibenden verfügbaren Werkzeuge sind mit

$$T_{verbleib} = T^{|T_w| - w_{kap}} \quad (5.45)$$

definiert.

$T_{verbleib}$ gibt den Lagerbestand in der Zwischenablage außerhalb des Magazins an, T_w ist die Anzahl der Werkzeuge. M bezeichnet das Magazin mit w_{kap} als Magazingröße, ausgedrückt durch die Anzahl der Werkzeugspeicherplätze. Die Variable w_j gibt den Wechselindex an. Der Operationszeitpunkt des Werkzeugwechsellvorgangs geht aus dem NC-Programm hervor. Diese Operationszeitpunkte werden durch das automatisierte Auslesen erkannt und sind exemplarisch in der Abbildung 19 umrahmt.

```

N100 G17
N110 T1 S1250 M03
N120 G00 X-10 Y-10 Z-4.5
N130 G43
N140 G01 X7.5 F300
N150 G41
N155 T9021
N160 G01 Y82.5
N170 G01 X82.5
N180 G01 Y7.5
N190 G01 X-10
N200 G40
N205 T9021

```

Abbildung 19: NC-Programm-Ausschnitt mit markierten Funktionen für den Werkzeugwechsel (vgl. [FrKe84])

Annahmen:

Die Plätze im Werkzeugmagazin für die einzelnen Werkzeuge stehen in identischen Abständen zueinander. Der Abstand zum nächsten Werkzeugspeicherplatz (direkter Nachbar) kann über den Durchmesser d_{Aufnahme} einer Werkzeugaufnahme definiert werden. Wenn z. B. eine Steilkegel- (SK) oder Halbhohlkegel-Aufnahme (HSK) verwendet wird, dann ist der Abstand zwischen zwei Plätzen als Kegeldurchmesser der Kegelbasis der zugrunde liegenden Werkzeugaufnahme als Messgröße verwendbar. Messnullpunkt ist der Mittelpunkt des Kegelbasisdurchmessers. Die Abbildung 20 verdeutlicht den Sachverhalt.

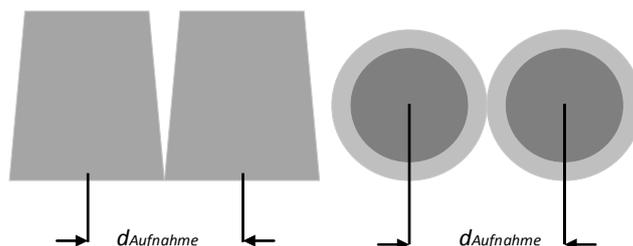


Abbildung 20: Technologischer Abstand zwischen zwei Magazinplätzen

Die Beschleunigung und Bremsung der Werkzeugmagazinrotation zwischen den Wechselvorgängen können als konstante Parameter angenommen werden, die in der weiteren Betrachtung insgesamt vernachlässigt werden.

Die Werkzeuge können in der Maschine auf den jeweiligen Plätzen vorprogrammiert werden, sodass die Maschine beim Abrufen des Wechselbefehls das notwendige Werkzeug auswählt. In der Praxis sind heutzutage Wechselvorrichtungen mittels Doppelgreifer üblich, sodass aus dem Magazin ein Werkzeug entnommen werden kann und zeitgleich das genutzte Werkzeug aus der Hauptspindel gezogen, getauscht und das alte Werkzeug in den frei gewordenen Platz abgelegt wird. Zeitgleich wird das neue Werkzeug in die Hauptspindel überführt. In der heutigen Zeit muss nicht zwingend eine fest programmierte Werkzeugplatzvergabe im Magazin erfolgen, sodass die Werkzeugwechsellvorrichtungen eine hohe Flexibilität zulassen.

Weitere Grundannahmen und Angaben zum Werkzeugmagazin-System:

- Einzupflegende Werkzeuge, ausgehend vom NC-Programm, können nicht die Speicherkapazitäten des Magazins überschreiten, sodass hier ein Auslagern notwendig ist.
- Die Kapazität des Magazins nimmt bei der Verwendung von größeren Werkzeugen, die ggf. Nebenplätze belegen, zwangsläufig ab.
- Der Mindestabstand zum Werkzeug bzgl. der Nullpunkteinstellung im Arbeitsraum der Maschine muss mindestens der Länge des längsten Werkzeugs (z. B. Bohrer) bzw. dem größten Durchmesser des größten Werkzeugs entsprechen.
- Bei häufiger Nutzung steigt vermehrt die Abnutzung oder die Gefahr einer Beschädigung. Ab dem Erreichen einer bestimmten Grenznutzungsanzahl (Berücksichtigung der Standzeit) wird das Werkzeug durch ein Zwillingswerkzeug (oder ein gewartetes alternatives Werkzeug) ersetzt.
- Zwillingswerkzeuge können eingesetzt werden, wodurch die Kapazität für andere, artverschiedene Werkzeugplätze vermindert wird, was dazu führen kann, dass ein Auslagern notwendig ist.
- Längere Wechselwege werden zugelassen, wenn dafür Fertigungsunterbrechungen durch Lagerzugriffe vermieden werden.
- Für die Standzeitüberwachung ist es zwingend notwendig, dass die Werkzeuge, die im NC-Programm häufig durch die Kennung T (sog. T-Nummer) gekennzeichnet sind, auch während der Fertigung einen realen physikalischen Arbeitsingriff auf das Werkstück haben. Diese Notwendigkeit ergibt sich aus der Ermittlung der Reststandzeit, die mittels Vorschub und Zeitintervall zwischen zwei NC-Sätzen, die mit einer T-Kennzeichnung versehen sind, ermittelt wird. Ausschlaggebend dafür ist die berechnete Werkzeugeingriffszeit. Bei realem Nichtkontakt zwischen Werkzeug und Werkstück besteht das Risiko, dass Reststandzeiten fälschlicherweise erfasst werden.

5.2.2 Erstellung eines MWZW nach Vorbild einer realen Werkzeugmaschine

5.2.2.1 Optimierung der Werkzeugpositionierung mithilfe des GA

Für das Lösen von Problemen aus der Kombinatorik hat sich die Nutzung des genetischen Algorithmus (GA) bewährt (vgl. [DeFi00], [GePo10] S. 109–139) und kann daher zur Bewertung der Werkzeugpositionierung als Optimierungskomponente verwendet werden. Hierzu wird eine Kombination der Metaheuristik mit dem MWZW vorgenommen, was die Wechselarten- und die Anzahl der Werkzeugmagazineinzelbestückungen in Abhängigkeit von einem zugrunde liegenden NC-Programms (Prozesse) abzählt. Mit Unterstützung einer Bewertungsfunktion wird eine Bestückungsstrategie initialisiert, die zu

zeitminimalen (mindestens zeitreduzierenden) Wechselvorgängen durch verbessertes Positionieren der Werkzeuge führen soll. Die prozesszugehörigen Einzelzeiten werden dafür empirisch ermittelt. Die initiale Bestückung zu Beginn wird durch den GA vorgenommen (vgl. [LKM+99]). Die technische Umsetzung erfolgt auf Basis der *MATLAB* Optimierungs-Toolbox (vgl. Anhang A2.2). Der Pseudocode des GA ist in Anhang A2.5, Pseudocode 4 gezeigt.

Zur Identifizierung der quasi-optimalen Bestückungsreihenfolge und Platzzuordnung der Werkzeuge an freie Magazinplätze unter Berücksichtigung der NC-Befehle sind zunächst verschiedene Prozesse an der Werkzeugmaschine aufgenommen worden, die mittelbar und unmittelbar den Wechselvorgang betreffen. Das MWZW wird durch die zugrunde liegende Werkzeugmaschine *Emcomill E 350*, eine 3-Achs-CNC-Fräsmaschine, inspiriert. Die Achsen der Maschine sind für dieses Vorhaben irrelevant, da nur das Werkzeugmagazin und der damit verbundene Werkzeugwechselvorgang einbezogen werden. Die notwendigen Zeitaufnahmen zur Parametrisierung des Modells basieren auf der Span-zu-Span-Zeit-Erfassung nach VDI 2852 Blatt 1 (vgl. [VDI2852]). Dieses Vorgehen ist mit der Belegungszeit für Betriebsmittel vergleichbar, die die Vergabezeit für die Belegung eines Betriebsmittels (z. B. Maschine) zur Herstellung einer Losgröße ausdrückt (vgl. [FGH+08]). Die zugrunde liegende Maschine besitzt ein Werkzeugmagazin mit 20 Werkzeugplätzen in Form eines rotierbaren Scheibenmagazins (vgl. [WeBr05]), ausgestattet mit einem Doppelgreifer. Das Magazin ist in zwei Richtungen axial rotierbar. Ein Nachfolgewerkzeug wird durch den Greifer aus dem Magazin und das zuletzt genutzte Werkzeug parallel aus der Spindel entnommen. Durch eine 180-Grad-Drehbewegung wird das zuletzt verwendete Werkzeug in das Magazin überführt (in den frei gewordenen Werkzeugplatz), während das neue Werkzeug in die Arbeitsspindel gefügt wird. Die Werkzeugaufnahme ist bei der zugrunde liegenden Maschine ein Steilkegel (SK).

5.2.2.2 Prozesse des MWZW

Die in Kapitel 5.2.2.3 angedeuteten Einzelprozesse der Wechselvorgänge einer Werkzeugmaschine im Allgemeinen bzw. einer Fräsmaschine im Besonderen sind für die Erstellung eines Wechselvorgangsmodells der Werkzeuge essenziell. Unter dem Vorbild dieser Prozesse ist aus Gründen der Übersichtlichkeit das Berechnungsmodell schematisch in diesem Kapitel in Abbildung 21 als Ablaufdiagramm dargestellt. Es wird dabei nicht nur der alleinige Wechselvorgang abgebildet, sondern auch die Interaktion mithilfe einer Lagereinheit. Diese ist zum einen notwendig, wenn das benötigte Werkzeug aufgrund einer mangelnden Vorbereitung nicht vor der Bearbeitung in das Magazin eingepflegt ist, und zum anderen, wenn für ein Werkstück (mit einem höheren Komplexitätsgrad) mehr individuelle Werkzeuge unterschiedlicher Technologien benötigt werden, als Kapazität im Magazin vorhanden ist. Eine mögliche Berücksichtigung von mehreren Folge-NC-Programmen (Folgeaufträge) wird ebenfalls vorgenommen, sodass die Werkzeugpositionierung nicht auf Basis eines einzelnen NC-Programms erfolgen muss, sondern auch bei mehreren NC-Programmen zur Fertigung eines oder mehrerer Werkstücke.

Die einfache Positionierung der Werkzeuge im Werkzeugmagazin kann in Form einer trivialen Lösung als *zufällig angeordnete Werkzeugpositionierung* angenommen werden. Der Werker kennt möglicherweise das zu fertigende Produkt aus früheren Zyklen und aus ergänzenden Planungswerkzeugen die Notwendigkeit bestimmter Werkzeuge und ordnet diese ausgehend von seinem Ausbildungsstand und seiner Erfahrung an.

Im Regelfall werden nach erster Überlegung die Werkzeuge nach der Reihenfolge, in der sie im zugrunde liegenden NC-Programm vorkommen, definiert. Dabei werden allerdings keine Folgenutzungen berücksichtigt und eine Abnutzung bzw. Beschädigungen mit dem Risiko in Kauf genommen, innerhalb eines Fertigungsprozesses die Maschine anzuhalten und das Werkzeug manuell zu wechseln. Problematisch ist der Wechsel des Werkzeugs dann, wenn kein Ersatzwerkzeug im Magazin vorliegt und die Fertigung für einen längeren Zeitraum unterbrochen werden muss. Der manuelle Wechselprozess erfolgt mit wenigen Handgriffen. Das Wieder-Anfahren der Maschine kann jedoch aufwendiger sein, da zuerst der Nullpunkt angefahren wird. Im speziellen Fall ist zu beachten, dass die Werkzeugführung die Fertigung exakt an der zuletzt vorliegenden Eingriffsstelle ohne Versatz wieder aufnimmt (Einhalten von Toleranzen). Ansteigende Zykluszeiten sind die Folge. Die Häufigkeit der Nutzung bzw. Nutzenfrequenz bestimmter Werkzeuge ist ebenfalls nicht unbedingt bekannt. Die Nummerierung der Werkzeuge im NC-Programm wird den Werkzeugplätzen in der Werkzeugwechsellvorrichtung der Maschine durch eine manuelle Programmierung mitgegeben bzw. kann rechnergestützt erfolgen und erfordert fehlerfreie Angaben. Um diesen Umständen entgegenzuwirken, sind Strategien notwendig, die bereits im Arbeitsvorbereitungsprozess benötigt werden.

Im MWZW werden dazu „Quasi-Abfragen“ erfolgen. Zunächst wird ermittelt, ob ein neuer Wechsel vorliegt, und wenn diese Prüfung als positiv bewertet wird, erfolgt die Prüfung des Befüllungsstatus des aktuellen Zustands der Werkzeugführung („Arm“). Wenn der Wechselarm belegt ist, wird das Werkzeug abgelegt. Wenn ein artverschiedenes Werkzeug notwendig ist, wird geprüft, ob das benötigte Werkzeug auf dem aktuellen Tauschindex verfügbar ist. Gemeint ist die Position im Magazin, auf die in geringster Distanz zugreifbar ist. Sollte der Tauschindex nicht mit der Wechselposition übereinstimmen, dann wird das Magazin rotiert. Dabei wird die Rotationsrichtung in Abhängigkeit von der kürzesten Distanz zum benötigten Wechselindex ausgewählt. Dadurch wird auch eine gewisse Realitätsnähe gewährt. Wenn der Wechselindex bereits an der Wechselposition angelangt ist, wird mittels Doppelarm das Werkzeug getauscht. Vor einem Werkzeugwechsel kann auch die Situation auftreten, dass das nachgefragte Werkzeug nicht im Werkzeugmaschinenmagazin abgelegt ist. Dazu wird geprüft, ob das Werkzeug in der Lagereinheit vorliegt. Das Vorhandensein des Werkzeugs in der Lagereinheit hängt davon ab, ob es nicht durch Beschädigung entfernt bzw. (wieder)beschafft wurde. In der Grundprämisse wird davon ausgegangen, dass alle notwendigen Werkzeuge auch vorhanden sind. Der Fall eines zufälligen Nicht-Vorhandenseins kann mithilfe einer Zufallsoperation (Zufallsvariable, Verteilungsfunktion o. Ä.) modelliert werden, sofern dieses

Szenario hinsichtlich der Strategieentwicklung gewünscht ist. Ist ein benötigtes Werkzeug nicht vorhanden, muss es beschafft werden, was in der Bewertungsfunktion mit einer Zeitstrafe¹⁵⁷ abgebildet wird. Wenn ein Werkzeug durch Beschädigung, die durch Abnutzung oder durch unsachgemäße Verwendung zustande kommt, nicht mehr greifbar ist, werden dadurch ebenfalls „Strafen“ verrechnet. Dieser Fall ist aber gesondert zu behandeln, da vorab eine Standzeitüberprüfung vorgenommen wird und zunächst davon ausgegangen werden kann, dass die einzuwechselnden Werkzeuge eine standzeitadäquate Fertigung ermöglichen.

Wenn das benötigte Werkzeug in der Lagereinheit vorhanden ist, wird es dem „Arm“ übergeben, und der freie Platz im Magazin wird belegt. Es kann dabei nicht vorkommen, dass mehr Werkzeuge in das Magazin eingepflegt sind, als Plätze vorhanden sind. Das bedeutet, dass der „Arm“ immer ein Werkzeug ablegen muss. Im schlechtesten Fall kann durch den Wechselprozess des Werkzeugs, ausgehend von der Lagereinheit zum Magazin, eine weniger vorteilhafte Wechsellösung auftreten, sodass ggf. eine Neuordnung erforderlich ist. Die Neuordnung ist nur dann sinnvoll, wenn der geschätzte Neuordnungsvorgang weniger Zeit in Anspruch nimmt als die Summe aller Wechsellösungen durch die verbleibenden Fertigungsschritte inklusive Werkzeugwechseloperationen und Magazinrotationszeiten. Es ist im Allgemeinen davon auszugehen, dass dieser Fall selten auftritt, er wird jedoch zur Vollständigkeit aufgeführt. Auch die Prüfung der Größe der Werkzeuge ist notwendig. Es gibt Werkzeuge, die mehr als einen Platz im Magazin belegen, da die Aufnahmedurchmesser von der Norm abweichen.

¹⁵⁷ Hierfür könnte auch ein Kostenmodell einbezogen werden, das die „Bestrafung“ durch Kosten bzw. repräsentative Geldeinheiten/Strafkosten abbildet.

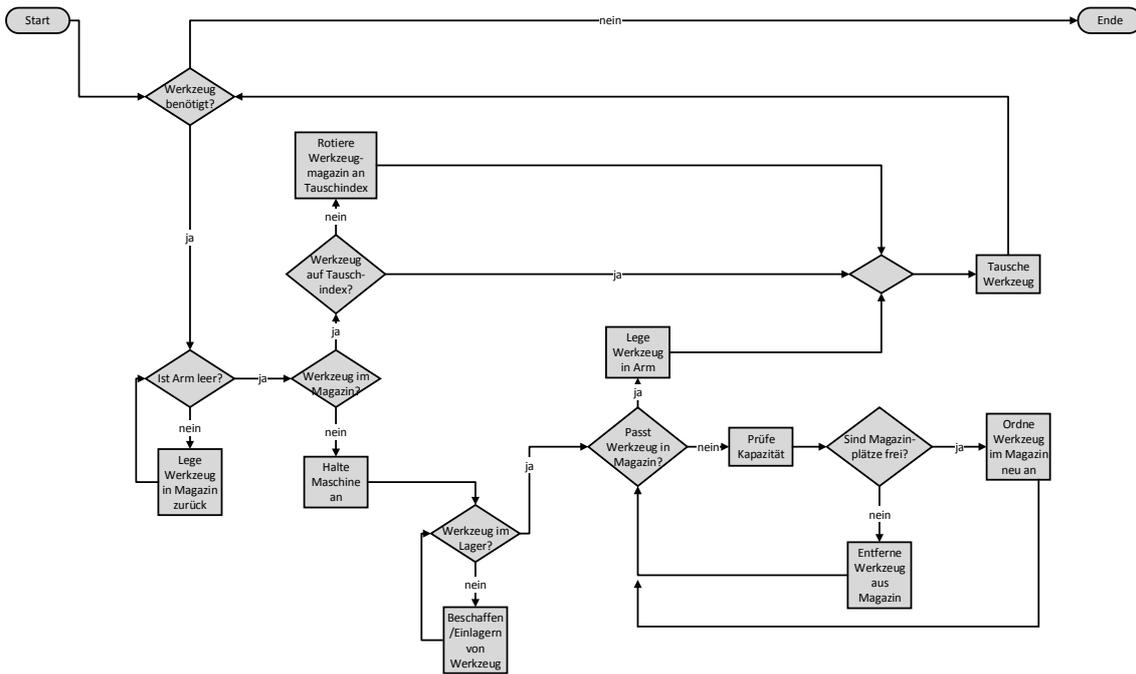


Abbildung 21: Ablaufdiagramm des MWZW

5.2.2.3 Einzelprozesse verschiedener Werkzeugwechselsituationen

Beim Werkzeugwechsel an einer Fräsmaschine lassen sich verschiedene Prozesse erkennen, die aus unterschiedlichen Verhalten und Ereignissen resultieren. Der wesentliche Prozess, der nur den Werkzeugwechsel betrifft, ist der Werkzeugwechsel während der Fertigung, ausgelöst durch den Befehl des NC-Programms. Die Abbildung 22 stellt den Prozess vereinfacht als Ablaufdiagramm dar. Der markierte Kasten beinhaltet die Prozessanteile, die durch die Span-zu-Span-Zeit erfasst werden. Als Vorbild dient dazu ebenfalls die 3-Achs-CNC-Fräsmaschine *Emcomill E 350*, die auch die Basis des Modells stellt.

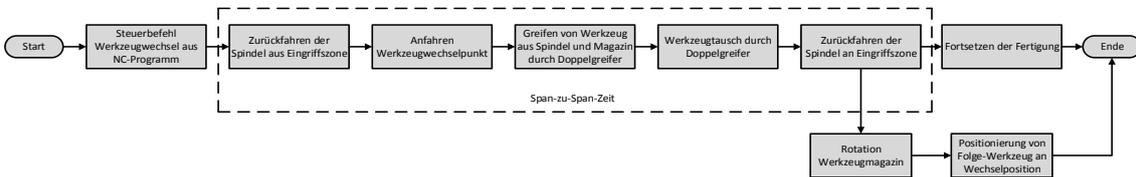


Abbildung 22: Handlungsprozess beim Werkzeugwechsel während der Fertigung

Die Abbildung 23 stellt den Prozess dar, bei dem ein neues Werkzeug der Werkzeugmaschine übergeben wird, die das Werkzeug wiederum in das Magazin einfügt. Ein direktes Einfügen der Werkzeuge von Hand in das Magazin über einen manuellen Steckvorgang ist aus sicherheitstechnischen Gründen (Quetschgefahr) konstruktiv und steuerungstechnisch (durch den Maschinenhersteller) unterbunden worden. Das bedeutet, dass bei jedem

Entnahme- und Einfüge-Prozess das Werkzeug über die Werkzeugaufnahme der Spindel und den Doppelgreifer erfolgen muss. Die Simulation wird unter Berücksichtigung der einzelnen aufgenommenen Prozesszeiten nah an die reale Werkzeugwechselvorrichtung gehalten.

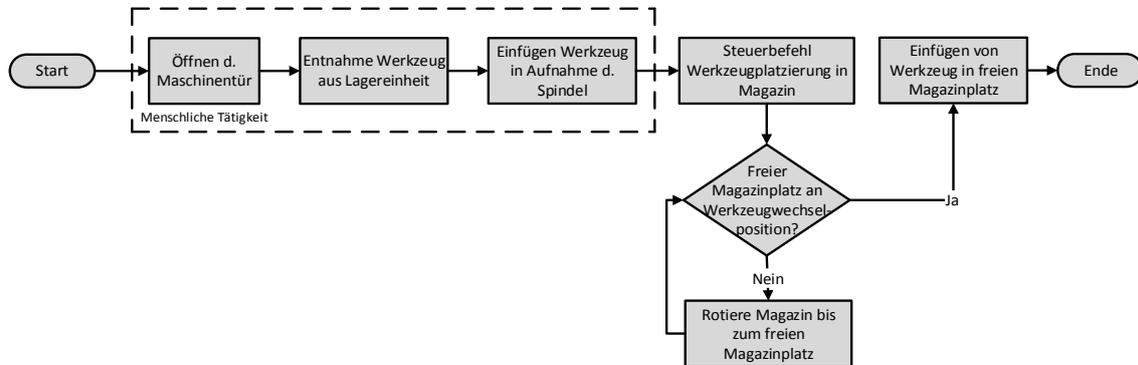


Abbildung 23: Handlungsprozess beim Werkzeugbestücken von der Lagereinheit in das Werkzeugmagazin

Der Teilprozess einer Wechselsituation in Gegenrichtung zur Abbildung 23 wird in Abbildung 24 als Entnahmeprozess der Werkzeuge aus dem Magazin illustriert. Mit ausreichenden Wiederholungshandlungen führt dieser Prozess zu einer sukzessiven Leerung des Werkzeugmagazins. Die Prozesse der Abbildung 23 und Abbildung 24 zeigen nur die Leerung und Befüllung, damit eine Umsortierung vorgenommen werden kann.

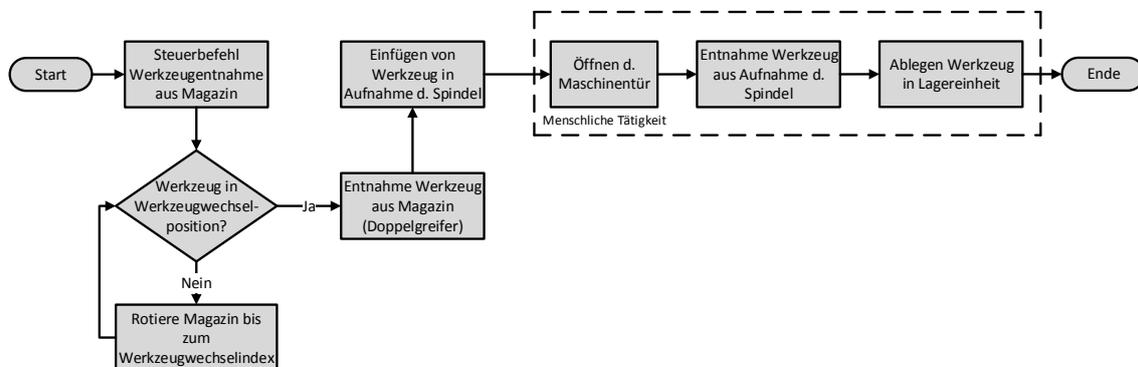


Abbildung 24: Handlungsprozess bei der Werkzeugentnahme vom Magazin in die Lagereinheit

Die jeweiligen Prozesse in der Abbildung 23, Abbildung 24 und Abbildung 25 treten (auch) nach einer Unterbrechung des Fertigungsprozesses auf, wenn z. B. ein beschädigtes¹⁵⁸ Werkzeug entnommen bzw. ausgetauscht werden muss. Dabei besteht die Option, sukzessiv neue Werkzeuge in das Magazin abzulegen, ohne die Fertigung direkt (nach jeder Bestückungsoperation) fortzusetzen. Die Nutzung von Zwillingswerkzeugen, auf die ausgewichen werden kann, wird ebenfalls optional aufgenommen, und der Nutzer

¹⁵⁸ Das Werkzeug muss nicht zwangsläufig beschädigt sein. Ein Überschreiten der Standzeit würde nach der dargelegten Logik ebenfalls zu einer Unterbrechung führen, sollte die Vorabüberprüfung an dieser Stelle fehlschlagen oder nicht erfolgen.

kann theoretisch mehrere Werkzeuge eines Typs einpflegen, sollte die Kapazität ausreichen. Eine Zwillingswerkzeugnutzung¹⁵⁹ kann hilfreich sein, wenn die Fertigung aufgrund von Werkzeugschäden und -abnutzung nicht unterbrochen werden soll. Auch können mögliche Zeitersparnisse durch geringere Rotationsvorgänge des Magazins ausgenutzt werden. Zu beachten ist hierbei, dass der Einsatz von Zwillingswerkzeugen immer zusätzliche Magazinplätze benötigt.¹⁶⁰

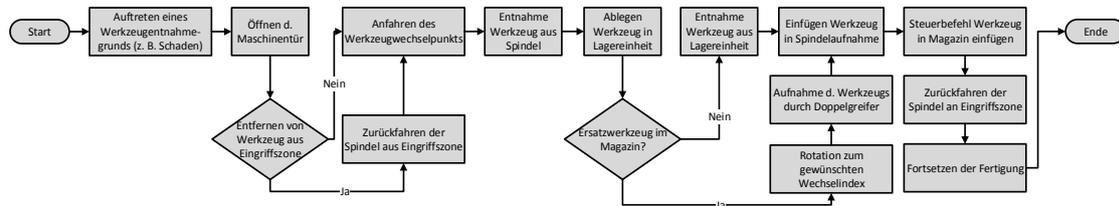


Abbildung 25: Handlungsprozess bei manuellem Werkzeugtausch und allgemeiner Unterbrechungen der Fertigung

5.2.2.4 Erfassung und Berechnung von Prozesszeiten anhand einer realen Maschine

Die relevanten Prozessschritte, die den Werkzeugwechsel betreffen, wurden durch eine empirische Zeitmessung vorgenommen, wobei die Span-zu-Span-Zeit nach VDI 2852 Blatt 1 als Grundlage dient. Die Span-zu-Span-Zeiterfassung ist eine Methode, um unter geregelten Konfigurationen Werkzeugmaschinen und deren Leistungen miteinander zu vergleichen (vgl. [VDI2852]). Details zu Messungen und Dokumentationen der Span-zu-Span-Zeit und der damit verbundenen Versuchsaufbau und -durchführung sind im Anhang A2.1 aufgeführt.

Bei den gemessenen Prozessen handelt es sich um die Rotationszeit eines Werkzeugmagazinplatzes n zum nächstgelegenen Magazinplatz ($n+1$). Dieser Prozess ist inklusive der Vorgänge des automatischen Schließens und Öffnens der Werkzeugmaschinen-Arbeitsraumtür (manuelles Betätigen eines Knopfdrucks zuzüglich Schließ-/Öffnungsvorgang) sowie der Wechsellvorgang des Doppelgreifers, wenn ein Werkzeug übernommen, und durch eine 180-Grad-Rotation ein anderes Werkzeug auf den freien Platz positioniert wird. Der manuelle Werkzeugein- und -ausbau zwischen Magazin und Lagereinheit ist ebenfalls erfasst. Durch Summierung der einzelnen Prozessgrößen lassen sich einzelne Prozesszeiten errechnen, wodurch das MWZW nah am Vorbild der realen Wechsellvorrichtung agieren kann. Die Tabelle 9 gibt das arithmetische Mittel der ermittelten Zeiten

¹⁵⁹ Hierbei ist der Rückgriff auf ein alternatives Werkzeug (gleicher Werkzeugtyp) aus dem Magazin mit identischer Technologie gemeint.

¹⁶⁰ Die Technologievariabilität des vorliegenden Werkzeugmagazinstatus nimmt mit zunehmenden Zwillingswerkzeugen ab. Bei komplexen Fertigungsaufträgen kann dies im schlechtesten Fall dazu führen, dass das Werkstück mit einer solchen Magazinbelegung nicht vollständig gefertigt werden kann.

der Messreihen wieder sowie die zugehörige Varianz, Standardabweichung und den Median¹⁶¹. Die Prozesszeiten müssen ihrer Herkunft nach normiert sein. Die Angaben in Tabelle 9 sind in der SI-Einheit Sekunde [s] angegeben.

Tabelle 9: Messzeiten der Prozesse zur Erstellung des MWZW auf Basis der SSZ

Prozessschritte	\bar{x} arithmetisches Mittel	s^2 Varianz	σ Standardabweichung	\tilde{x} Median
Arbeitsraumtür öffnen t_{auf}	$t_{auf}^{\bar{x}}$ 2,5875	$t_{auf}^{\sigma^2}$ 0,091956	t_{auf}^{σ} 0,303	$t_{auf}^{\tilde{x}}$ 2,50
Arbeitsraumtür schließen t_{zu}	$t_{zu}^{\bar{x}}$ 2,555625	$t_{zu}^{\sigma^2}$ 0,043550	t_{zu}^{σ} 0,209	$t_{zu}^{\tilde{x}}$ 2,515
Magazinrotation zwischen 2 benachbarten Plätzen t_{rot}	$t_{rot}^{\bar{x}}$ 0,318633333	$t_{rot}^{\sigma^2}$ 0,000805	t_{rot}^{σ} 0,028	$t_{rot}^{\tilde{x}}$ 0,3235
Werkzeugwechsel zwischen Doppgreifer und Magazin t_{ww}	$t_{ww}^{\bar{x}}$ 2,437083333	$t_{ww}^{\sigma^2}$ 0,111029	t_{ww}^{σ} 0,333	$t_{ww}^{\tilde{x}}$ 2,485
Einbau eines Werkzeugs in die Spindel (von Lagereinrichtung) t_{ein}	$t_{ein}^{\bar{x}}$ 4,1075	$t_{ein}^{\sigma^2}$ 0,369269	t_{ein}^{σ} 0,608	$t_{ein}^{\tilde{x}}$ 3,98
Ausbau eines Werkzeugs in die Spindel (in Lagereinrichtung) t_{aus}	$t_{aus}^{\bar{x}}$ 3,28625	$t_{aus}^{\sigma^2}$ 0,146198	t_{aus}^{σ} 0,382	$t_{aus}^{\tilde{x}}$ 3,325

Die während eines Fertigungsprozesses auftretenden Wechselsituationen in der Werkzeugmaschinenumgebung, wie sie in der Abbildung 22 bis Abbildung 24 (ferner auch Abbildung 25) angedeutet sind, können durch Addition der einzelnen Teilzeiten aus der Tabelle 9 errechnet und in das Simulationsmodell implementiert werden. Davon ausgehend, dass die Rotationszeiten des Werkzeugmagazins dadurch kompensiert werden, dass während der einzelnen Fertigungsschritte zwischen zwei Werkzeugwechseln die nachfolgenden benötigten Werkzeugplätze zu dem Werkzeugwechsellpunkt parallel bewegt werden, sodass nur der Wechsel an sich notwendig wird, werden die Prozesszeiten wie folgt definiert:

¹⁶¹ Der Median ist eine ausreißerunempfindlichere statistische Größe als das arithmetische Mittel. Vorab ist eine Überprüfung notwendig, ob Ausreißer vorliegen, und entsprechend ist die statistische Größe zu wählen. In dem vorliegenden Fall ist dieser Umstand jedoch relativiert, da sich wenig Ausreißer ergeben haben und eine geringe Differenz zwischen \bar{x} und \tilde{x} feststellbar ist.

Bestückung des Magazins unter Berücksichtigung von*Arithmetisches Mittel:*

$$t_{bestücken}^{\bar{x}} = t_{auf}^{\bar{x}} + t_{ein}^{\bar{x}} + t_{ww}^{\bar{x}} \quad (5.46)$$

Median:

$$t_{bestücken}^{\tilde{x}} = t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{ein}^{\tilde{x}} + t_{ww}^{\tilde{x}} \quad (5.47)$$

Werkzeugentnahme aus dem Magazin unter Berücksichtigung von*Arithmetisches Mittel:*

$$t_{entnehmen}^{\bar{x}} = t_{auf}^{\bar{x}} + t_{aus}^{\bar{x}} + t_{ww}^{\bar{x}} \quad (5.48)$$

Median:

$$t_{entnehmen}^m = t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{aus}^{\tilde{x}} + t_{ww}^{\tilde{x}} \quad (5.49)$$

Der Werkzeugwechselfvorgang während der Fertigung, ausgehend von den NC-Befehlen, ist durch die Wechselzeit zwischen Doppelgreifer und Magazin definiert. Unter Berücksichtigung des arithmetischen Mittels gilt $t_{wechsel}^{\bar{x}} = t_{ww}^{\bar{x}}$ und unter Berücksichtigung des Medians $t_{wechsel}^{\tilde{x}} = t_{ww}^{\tilde{x}}$.

Werkzeugwechselfvorgang durch Abbruch des aktuellen Fertigungsprozesses unter Berücksichtigung von*Arithmetisches Mittel:*

$$t_{abbrechen}^{\bar{x}} = t_{auf}^{\bar{x}} + t_{aus}^{\bar{x}} + t_{ein}^{\bar{x}} + t_{zu}^{\bar{x}} + t_{ww}^{\bar{x}} \quad (5.50)$$

Median:

$$t_{abbrechen}^{\tilde{x}} = t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{aus}^{\tilde{x}} + t_{ein}^{\tilde{x}} + t_{zu}^{\tilde{x}} + t_{ww}^{\tilde{x}} \quad (5.51)$$

Die Rotationen zwischen den benachbarten Magazinplätzen sind insb. dann zu berücksichtigen, wenn die Maschine nicht mit einem Doppelgreifer ausgestattet ist oder wenn nicht immer gewährleistet ist, dass das Magazin die nachfolgenden Werkzeugindizes an die Werkzeugwechselfposition verschiebt. Auch wenn die Fertigungszeit einer einzelnen Fertigungsoperation sehr kurz ist, sodass die Rotation noch nicht abgeschlossen ist, führt dies dazu, dass die Rotationszeiten für die quasi-optimale initiale Bestückung des Magazins relevant sind.

Dazu wurde empirisch die Zeit ermittelt, die für einen Rotationsschritt zwischen zwei Plätzen benötigt wird. Das bedeutet: Wenn z. B. das Werkzeugmagazin 20 Werkzeugplätze beinhaltet, dann wird die Zeit von einem Werkzeugplatzindex zum direkten Nach-

barn 1/20 einer vollständigen Rotation betragen. Eine Rotationseinheit sei als t_r angegeben. In Abhängigkeit von NC-Programm i kann mithilfe der Zählvariablen $n_r^{NC_i}$ die Anzahl der Werkzeugwechsel aus dem zugrunde liegenden NC-Programm ermittelt werden. Daraus ergibt sich als Erweiterung:

Bestückung des Magazins unter Berücksichtigung von

Arithmetisches Mittel:

$$t_{bestücken}^{\bar{x}} = t_{auf}^{\bar{x}} + t_{ein}^{\bar{x}} + t_{ww}^{\bar{x}} + t_r^{\bar{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.52)$$

Median:

$$t_{bestücken}^{\tilde{x}} = t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{ein}^{\tilde{x}} + t_{ww}^{\tilde{x}} + t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.53)$$

Werkzeugentnahme aus dem Magazin unter Berücksichtigung von

Arithmetisches Mittel:

$$t_{entnehmen}^{\bar{x}} = t_{auf}^{\bar{x}} + t_{aus}^{\bar{x}} + t_{ww}^{\bar{x}} + t_r^{\bar{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.54)$$

Median:

$$t_{entnehmen}^{\tilde{x}} = t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{aus}^{\tilde{x}} + t_{ww}^{\tilde{x}} + t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.55)$$

Für einen Werkzeugwechsel, der während der Fertigung stattfindet, ergibt sich ferner bzgl. des arithmetischen Mittels

$$t_{wechsel,rot}^{\bar{x}} = t_{ww}^{\bar{x}} + t_r^{\bar{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.56)$$

und bzgl. des Medians

$$t_{wechsel,rot}^{\tilde{x}} = t_{ww}^{\tilde{x}} + t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i}. \quad (5.57)$$

Werkzeugwechselfvorgang durch Abbruch des aktuellen Fertigungsprozesses unter Berücksichtigung von

Arithmetisches Mittel:

$$t_{abbrechen}^{\bar{x}} = t_{auf}^{\bar{x}} + t_{aus}^{\bar{x}} + t_{ein}^{\bar{x}} + t_{zu}^{\bar{x}} + t_{ww}^{\bar{x}} + t_r^{\bar{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.58)$$

Median:

$$t_{abbrechen}^{\tilde{x}} = t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{aus}^{\tilde{x}} + t_{ein}^{\tilde{x}} + t_{zu}^{\tilde{x}} + t_{ww}^{\tilde{x}} + t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i} \quad (5.59)$$

Um die oben genannten Gleichungen für eine Serie von NC-Programmen zu erfassen, die ggf. an einem oder mehreren Werkstücken eingesetzt werden, wird der Ausdruck $t_r^{\bar{x}} * n_r^{NC_i}$ bzw. $t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i}$ als Summe $\sum_{i=1}^I t_r^{\bar{x}} * n_r^{NC_i}$ bzw. $\sum_i t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i}$ ausgedrückt.

Bei den oben dargestellten Prozessen ist zu beachten, dass die Gleichungen 5.46 bis 5.59 immer nur einen einzigen abgeschlossenen Prozess darlegen. Im Zusammenspiel mit den gesamten NC-Operationen bzgl. der Werkzeugwechsel werden die vorkommenden Tei- loperationen wie das Schließen und Öffnen der Tür, die Werkzeugwechsel von der Spin- del zum Magazin und umgekehrt sowie die Unterbrechungen erfasst und mit den jewei- ligen gemessenen Zeitvariablen (Median oder arithmetisches Mittel) multipliziert (vgl. Kapitel 5.2.4 sowie Tabelle 9). Durch Einsetzen der ermittelten Messwerte aus Tabelle 9 ergeben sich die nachfolgenden Parameter in [s], die in der Tabelle 10 dargestellt werden:

Tabelle 10: Messergebnisse, basierend auf der SSZ nach VDI 2852 Blatt 1

$t_{bestücken}^{\bar{x}}$	9,132083333 s	$t_{bestücken,rot}^{\bar{x}}$	9,450716667 s
$t_{bestücken}^{\bar{x}}$	8,965 s	$t_{bestücken,rot}^{\bar{x}}$	8,965 s
$t_{entnehmen}^{\bar{x}}$	8,310833333 s	$t_{entnehmen,rot}^{\bar{x}}$	8,629466667 s
$t_{entnehmen}^{\bar{x}}$	8,31 s	$t_{entnehmen,rot}^{\bar{x}}$	8,6335 s
$t_{wechsel}^{\bar{x}}$	2,437083333 s	$t_{wechsel,rot}^{\bar{x}}$	2,437083333 s
$t_{wechsel}^{\bar{x}}$	2,485 s	$t_{wechsel,rot}^{\bar{x}}$	2,485 s
$t_{abbrechen}^{\bar{x}}$	14,97395833 s	$t_{abbrechen,rot}^{\bar{x}}$	15,1285 s
$t_{abbrechen}^{\bar{x}}$	14,805 s	$t_{abbrechen,rot}^{\bar{x}}$	15,1285 s

5.2.3 Verwerfungsstrategien zur Auswahl der auszuwechselnden Werk- zeuge

Nach dem Vorbild der Verwaltung von Cache-Speicher bei Rechnerressourcen (CPU) dient zur Lösung der „Magazinbelegungsverwerfung“ der *Bélády's Algorithmus* als In- spiration. Der „*Bélády's off-line optimal Algorithmus*“ (vgl. [BaNo03]) ist auch bekannt unter „*clairvoyant replacement algorithm*“, oder er wird synonym als „*optimal replace- ment strategy*“ bezeichnet (vgl. [BaNo03]).

Das Ziel, bezogen auf die Werkzeugmagazinbelegung, ist es, Werkzeuge aus dem Maga- zin auszuwechseln, wenn die Magazinkapazität überschritten wird oder das zulässige Ma- ximalgewicht¹⁶² durch die Werkzeuge, die sich in dem Magazin befinden, überschritten wird. Der *Bélády's Algorithmus (OPT)* wählt das Werkzeug zur Entnahme aus dem Ma- gazin aus, das für zukünftige Fertigungsoperationen mit der längsten Dauer nicht mehr genutzt wird. Dabei wird immer von dem aktuellen NC-Programm oder einer Reihe von NC-Programmen ausgegangen, die sukzessiv an der Werkzeugmaschine abgearbeitet und als ein „großes“ Gesamt-NC-Programm bezeichnet werden könnte.

Sei dazu w_{kap} die Speicherkapazität des Werkzeugmagazins mit $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_m \in w_{kap}$ als Elemente, die sich aktuell in w_{kap} befinden. Sei nun τ_{in} das in das Magazin einzufügende Element (Werkzeug). Außerdem sei die Funktion *time* wie folgt definiert:

¹⁶² Die Gewichtslast bzgl. des Magazins wird im Rahmen dieses Vorhabens nicht weiter beachtet, ist jedoch für zukünftige Entwicklungen interessant.

$$time: w_{kap} \rightarrow \mathbb{N} \cup \{\infty\} \quad (5.60)$$

Daraus ergibt sich für den Algorithmus die Anweisung:

time (τ_i) = n_{op} , wobei $n_{op} = inf \leftrightarrow \tau_i$ wird nicht mehr benötigt
sonst Element τ_i wird in n Zeitschritten benötigt.

Soll $d = \tau_{in}$ eingefügt werden, so wird dasjenige Element aus w_{kap} entfernt, für das gilt:

$$\tau_r: \forall \tau \in w_{kap}: time(\tau_r) \geq time(\tau_i). \quad (5.61)$$

Dabei ist n_{op} die Anzahl der Operationsschritte, ausgehend von den Werkzeugwechseln in dem NC-Programm, die die Distanz beschreiben, bis das am nächsten positionierte τ_m durch eine Operation nachgefragt wird. τ_r bezeichnet das Element im Magazin, das als Nächstes aussortiert wird ($r = removal$).

5.2.4 Bewertungsfunktion für die Werkzeugpositionierung, basierend auf NC-Programmbefehlen

Zur Bewertung der Werkzeugposition im Werkzeugmaschinenmagazin dienen in erster Linie die ermittelten Daten des MWZW. Dazu werden in Abhängigkeit von den Werkzeugwechseloperationen des NC-Programms die in Kapitel 5.2.2.3, Tabelle 9 ermittelten Zeitvariablen der einzelnen Prozesskonstanten (Türoperation, Wechseloperation sowie Ein- und Ausbau) erfasst und als Parameter definiert. Diese Zeitparameter werden mit der Anzahl der jeweils vorkommenden Operationsanzahlen (Zählvariablen) multipliziert. Allgemein werden somit alle Teilprozesse, die durch die Abbildung 22 bis Abbildung 25 abgebildet sind, berücksichtigt. Als Bewertungsfunktion ergibt sich somit¹⁶³:

$$K(i) = \sum_{i=1}^I t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NC_i} + \sum_i t_{auf}^{\tilde{x}} * n_{tür,auf}^{NC_i} + \sum_i t_{zu}^{\tilde{x}} * n_{tür,zu}^{NC_i} + \sum_i t_{ww}^{\tilde{x}} * n_{ww}^{NC_i} + \sum_i t_{ein}^{\tilde{x}} * n_{ein}^{NC_i} + \sum_i t_{aus}^{\tilde{x}} * n_{aus}^{NC_i} + K_{Beschaffung} \quad (5.62)$$

Die Magazindrehungen sind in diskrete Teildrehungen $t_r^{\tilde{x}}$ modelliert, die einen Rotationschritt als $1/20$ ¹⁶⁴ der gesamten Zeit einer vollständigen ununterbrochenen Magazinumdrehung ausmachen. Eine Teilumdrehung entspricht dabei einem diskreten Abstand zwischen zwei Werkzeugen, sodass mittels Zählvariablen die jeweilige Wechseldistanz zwi-

¹⁶³ Hier ist die Bewertungsfunktion exemplarisch für den Median angegeben. Für das arithmetische Mittel gilt diese äquivalent mit verändertem Index und dementsprechend eingesetzte Parameter. Da die Messzeiten in der hier vorgestellten Anwendung keine großen Differenzen aufweisen, sind die Ergebnisse bei Einsetzen von arithmetischem Mittel oder Median auf vergleichbarem Niveau, sodass es für das Gesamtergebnis nicht ausschlaggebend sein wird (vgl. Ergebnisse in Kapitel 6.3, insb. 6.3.2.2), welcher Wert gewählt wird, solange eine konsistente Anwendung gilt.

¹⁶⁴ Die Angabe $1/20$ bezieht sich auf die 3-Achs-Fräsmaschine *Emcomill E350* mit der Magazinplatzkapazität = 20. Bei vergleichbaren Werkzeugmagazintypen dritter Maschinenhersteller ergibt sich diese Angabe aus der Magazinumdrehungszeit für eine gesamte Rotation, ausgehend von einem definierten Magazinplatz, dividiert durch die Anzahl der Werkzeugplätze.

schen zwei Werkzeugen erfasst wird. Die Zählvariable ist durch n_r^{NCi} definiert (vgl. Kapitel 5.2.2.4). Die Türschließ- und -öffnen-Operation werden durch die Zeit-Variablen $t_{auf}^{\tilde{x}}$ und $t_{zu}^{\tilde{x}}$ mit den Zählvariablen $n_{tür,auf}^{NCi}$ und $n_{tür,zu}^{NCi}$ angegeben. Die Wechseloperation¹⁶⁵ durch den Doppelarm sei $t_{ww}^{\tilde{x}}$ mit der zugehörigen Zählvariablen $n_{ww}^{NCi} \cdot t_{ein}^{\tilde{x}}$ sowie $t_{aus}^{\tilde{x}}$ beziehen sich auf den Ein- und Ausbau eines Werkzeugs in/aus das/dem Magazin mit den Zählvariablen n_{ein}^{NCi} und n_{aus}^{NCi} . $K_{beschaffung}$ ist ein Parameter, der unvorhersehbare Events bzgl. der Werkzeugeinsatzbereitschaft „bestraft“¹⁶⁶. Dazu gehören Fälle wie die Nicht-Verfügbarkeit eines Werkzeugs sowie die Wiederbeschaffung oder nicht fertiggestellte Wartungsarbeiten bei Werkzeugen. Dies kann z. B. bei Verlust, Abnutzung oder neuartigem Technologievorkommen auftreten. Die Bewertung (vgl. Gleichung 5.62) erfolgt durch ein Abzählen und Summieren der Operationen und Zeiten, welches in dem Kontext zunächst sinnvoll ist, um einzelne Prozesse realitätsnah zu erfassen und die NC-Programm-Operationen exakt einzubinden. Eine individuelle Nutzung¹⁶⁷ durch das Modell wird allgemein ermöglicht trotz der nicht generischen Vorbildgrundlage durch die reale Maschine. Die Bewertungsfunktion lautet als allgemeiner Fitnessvektor:

$$\vec{f} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_n \end{pmatrix} + K_{const} \quad (5.63)$$

Nicht von Interesse seien hierbei das Bestimmen und Anfahren des Nullpunkts, das Festschrauben der Werkstückspannmittel bzw. das Anordnen des Werkstücks. Das Modell geht von der Annahme aus, dass bis auf das Werkzeugmagazin die vollständige Einrichtung erfolgt ist. Das Werkzeugmagazin kann als bereits gefüllter Initialzustand vorliegen, z. B. wenn ein Werkstück vorab bereits gefertigt wurde. Ebenfalls sind die Füllzustände „leer“ und „teilweise gefüllt“ möglich.

Sollte, ausgehend vom Ablaufdiagramm (vgl. Abbildung 21), ein Magazinbestückungs-Initialzustand vorliegen, beeinflusst dies die zu überprüfenden Zustände des Werkzeugmagazins durch das Berechnungsmodell. Hierbei werden die Zeiten jeweils addiert, die zu den Entscheidungsvariablen des Werkzeugwechselprozesses gehören. Eine binäre Prüfung identifiziert vorliegende bzw. eintretende Zustände. Für die Bewertung ergibt sich die Funktion, die auf Basis des Initialzustands prüft, ob eine Fertigung durchführbar ist, bzw. die Wechselsvorschriften und addierbaren Prozesszeiten berücksichtigt, damit das NC-Programm bearbeitet werden kann. Abbildung 26 illustriert dieses Vorgehen in einer Entscheidungsbaumansicht. Die Aussage zwischen den Gleichungen 5.62 und 5.64 ist äquivalent.

¹⁶⁵ Die gesamte Anzahl der Wechseloperationen wird durch das NC-Programm vorgegeben.

¹⁶⁶ Hier werden auch die Strafzeiten bzw. Strafkosten erfasst.

¹⁶⁷ Es sind für die betrachteten Werkzeugwechsellvorrichtungen und Maschinen die jeweiligen Zeitfaktoren anzupassen, sodass das Modell situativ zu weiteren Vorrichtungen kompatibel ist.

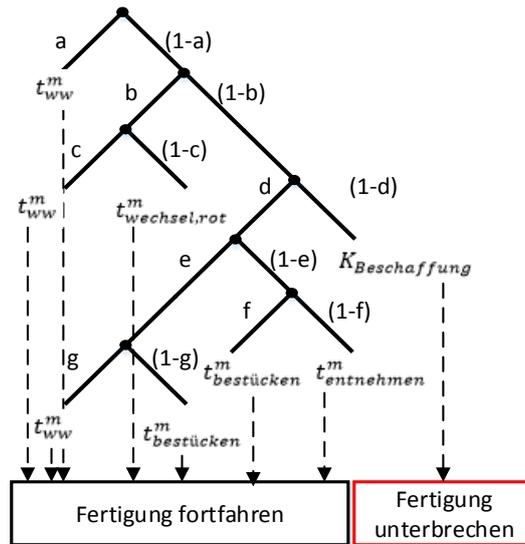


Abbildung 26: Entscheidungsbaum für das MWZW

Für die Variablen $a, b, c, d, e, f, g \in \{1,0\}$

gilt $\rightarrow \begin{cases} 1 & \text{wenn der Initialzustand der Werkzeugmagazinbestückung vorliegt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Nach Abbildung 26 lautet die Bewertungsfunktion (Gleichung 5.64) für einen vorliegenden Initialzustand der Werkzeugbestückung des Magazins wie folgt:

$$\begin{aligned}
 K(\text{initial}) = & a * t_{ww}^{\tilde{x}} + (1 - a) * (b * (c * t_{ww}^{\tilde{x}} + (1 - c) * t_{wechsel,rot}^{\tilde{x}}) \\
 & + (1 - b) * (d * (e * (g * t_{ww}^{\tilde{x}} + (1 - g) * t_{bestuecken}^{\tilde{x}}) \\
 & + (1 - e) * (f * t_{bestuecken}^{\tilde{x}} + (1 - f) * t_{entnehmen}^{\tilde{x}})) \\
 & + (1 - d) * K_{Beschaffung})))
 \end{aligned} \tag{5.64}$$

Initial beschreibt hier die Funktion, die durch das Berechnungsmodell vorliegt, in der jeder Magazinzustand unter Voraussetzungen und Bezug nehmend auf die Entscheidungen (Variablen a bis g) vorliegen kann. Diese Funktion gilt für einen Startinitialzustand des Werkzeugmagazins und wird so lange wiederholt, bis alle Operationen des NC-Programms abgeschlossen sind. Dabei führen die mehrheitlichen Zustände zu einem fortgesetzten Fertigungsprozess. Nur bei dem Nichtvorliegen eines Werkzeugs im Magazin sowie in der Lagereinheit wird die Fertigung unterbrochen, da das Werkzeug in dem Fall beschafft werden muss. Die Funktion gibt die Zeit aus, die aus einer oder mehreren NC-Operationen unter vorliegender Magazinbelegung benötigt wird, und dient als Ergänzung zur Verifizierung der sinnvollen Magazinbestückung und der damit verbundenen Handlungsweisen des Maschinenbedieners.

Verknüpfung mit der Zielfunktion für die erweiterte Zykluszeitreduzierung:

Die ausgegebene Zeit, die aus den Werkzeugwechselbefehlen eines NC-Programmes resultiert und durch die Bewertungsfunktionen (vgl. Gleichung 5.62 oder 5.64) ausgegeben wird, wird zur Erfassung der Reduzierung der erweiterten Zykluszeit EZZ_{NC} (vgl. Kapitel

5.1.1 Gleichung 5.3 und 5.4) in $t_{Werkzeug}$ eingesetzt. EZZ_{NC} wird reduziert, wenn $t_{Werkzeug}$ reduziert wird, sodass gilt:

$$t_{Werkzeug} = K(i) \quad (5.65)$$

Für den Initialzustand des Modells gilt:

$$t_{Werkzeug} = K(initial) \quad (5.66)$$

5.2.5 Werkzeugpositionierungsstrategie

Die erste triviale Lösung für eine nutzbare Werkzeugpositionierung kann durch den „Greedy-Ansatz“ erfolgen. Das bedeutet, dass die Werkzeuge, die zuerst in der Fertigung, d. h. im NC-Programm, aufgerufen werden, auf die nächstgelegenen Werkzeugplätze verwiesen werden. Dadurch wird eine „nahezu optimale (Minimum)“ Lösung genau dann gefunden, wenn jedes Werkzeug nur für eine einzige Fertigungsoperation genutzt wird und die Anzahl der Werkzeuge die Magazinkapazität nicht übersteigt, wobei die zweite Bedingung nicht zwingend gelten muss.¹⁶⁸ Das bedeutet zum Beispiel, dass das Werkzeug mit der NC-Funktion T1 für die Operation „Bohrung anbringen, Durchmesser 13 mm und Bohrungstiefe 20 mm“ nur einmal im gesamten Fertigungsprozess unter Nutzung eines NC-Programms angewendet wird. Sollte dieselbe Bohrung mit den identischen geometrischen Attributen erneut eingebracht werden, dann würde im ausgehenden Fall ein identisches Werkzeug verwendet werden, was sich am Nachbarplatz befindet. Dieser Zustand lässt die Bestückung nunmehr als obsolet erscheinen: Die Wechselzeit wäre dann nahezu „minimal“, jedoch ist die Verwendung von identischen Werkzeugen mit unterschiedlichen T-Nummern wenig sinnvoll und nicht praxistauglich¹⁶⁹, da im schlechten Fall der Fertigungsprozess nicht beendet werden kann. Die Werkzeugplätze werden durch identische Werkzeuge belegt und können nur eine einzige mit anderen Werkzeugen identische Funktion (Technologie) erfüllen. Auch kann dieser Zustand zu einer Ressourcenverschwendung führen, wenn im Magazin wiederholt identische Werkzeuge auftreten.

Die Überschreitung der Magazinkapazität führt insgesamt zu einer ansteigenden Komplexität bei der Lösungssuche für eine praktikable Werkzeugmagazinbestückung wie auch der Umstand, dass Werkzeuge individuelle Technologien beinhalten können, die vermehrt für die Fertigung verwendet werden. Hierdurch können durch das Berechnungsmodell und die Bestückungsstrategie Rückschlüsse auf die Bauteil- und Fertigungskomplexität gezogen werden. Das NC-Programm kann hinsichtlich der Operationsreihenfolge

¹⁶⁸ Ausgehend davon, dass das Werkzeugmagazin als „Leerzustand“ vorliegt.

¹⁶⁹ In der verwendeten Maschinensteuerung können nicht zwei identische T-Nummern vergeben, jedoch können zwei identische Werkzeuge mit unterschiedlichen T-Nummern versehen werden. Zudem ist hierbei davon auszugehen, dass diesem einen Fertigungsprozess ein NC-Programm zugrunde liegt, was in der Praxis nicht die Regel ist.

evaluiert werden, sodass bestimmte komplexe Fertigungsschritte eine alternative Anordnung erhalten. Diese Möglichkeit wird hier nicht weiterverfolgt, ist jedoch für zukünftige Entwicklungsschritte denkbar.

In der Regel stehen verschiedene Werkzeuge durch die NC-Programmvorgabe zur Verfügung, sodass zunächst eine zufällige Werkzeugpositionierung vorgenommen wird. Hierbei werden bei der Bestückung die einzelnen Werkzeuge zufällig einem Platz im Werkzeugmagazin zugeordnet. Durch die Anwendung der Metaheuristik und der Bewertungsfunktion wird die Güte der Bestückung mithilfe der Berechnung der Prozesszeiten ermittelt. Die Belegung wird durch Minimierung der Bewertungsfunktion verbessert, ausgehend von der zufälligen Initialbelegung. Dabei ist die Werkzeugpositionierung in Abhängigkeit von den NC-Werkzeugwechselbefehlen als Problem aus der Kombinatorik zu verstehen. Die Wechselzeitpunkte sind durch das NC-Programm vorgegeben, und die Werkzeugreihenfolge ist vorab bekannt, wodurch sich hierzu der GA zur Lösung dieses Problems eignet (vgl. 5.2.2.1). Damit kann rechnergestützt ohne hohen Zeitaufwand und Bedienung der realen Werkzeugmaschine eine sinnvolle Startbelegung, d. h. eine Werkzeugpositionierung zu Beginn der Fertigung, generiert werden. Diese Startbelegung führt zu verringerten Rotationszahlen der Werkzeugplätze, wodurch $t_{Werkzeug}$ verringert wird.

In Kapitel 6.3 erfolgen Testläufe zur Werkzeugpositionierung unter Anwendung des MWZW in Kombination mit der Metaheuristik. Der Ansatz unterliegt ferner einem Vergleich mit der herkömmlichen Methode der Werkzeugpositionierung durch Werkzeugpositionierungsvorschläge von natürlichen Personen¹⁷⁰ sowie des „Greedy-Ansatzes“ und eines LPs.

5.2.6 Kritische Bewertung des MWZW

Derzeit bildet das MWZW sinnvolle Verhaltensweisen des Werkzeugmagazins sowie den Werkzeugwechselprozess ab. Dabei werden Sicherheitsaspekte für den Menschen berücksichtigt, sodass Wechselprozesse z. B. nicht mit geöffneter Maschinentür gestartet werden können. Nicht berücksichtigt ist, dass die Einzelrotationen des Werkzeugmagazins von Index i zu dem Wechselindex $i + 1$ parallel zur Fertigung erfolgen können.¹⁷¹ Reale Wechselzyklen können daher in kürzeren Intervallen erfolgen als in dem Modell angenommen. In der Regel wird davon ausgegangen, dass die Fertigungsoperation mehr Zeiteinheiten benötigt als der Werkzeugwechselvorgang. Dieser Zustand ist insgesamt nicht dramatisch, weil dadurch für alle Belegungsstrategien dieselben Zeitverlängerungen durch die nichtparallelen Wechsel- und Fertigungsprozesse in die Bewertung einbezogen werden. Bemerkbar macht sich dieser Kritikpunkt dann, wenn die Zeiteinheiten für eine

¹⁷⁰ Die natürlichen Personen weisen untereinander vergleichbare Qualifikationen auf. Sie erhielten die Aufgabe, eine planmäßige initiale Werkzeugpositionierung zu schaffen, damit ein Vergleich mit den hier geschaffenen Ansätzen hergestellt werden kann.

¹⁷¹ Die parallele Rotation der Wechselindizes während einer Fertigungsoperation hängt allgemein von der Funktion und Steuerung der individuellen Maschine und Werkzeugwechsellvorrichtung inklusiven Werkzeugmagazins ab.

Fertigungsoperation geringer sind als die Magazinrotationszeit zwischen zwei Werkzeugplätzen. Eine parallele Rotation des Werkzeugmagazins während der Fertigung ist in diesem Fall vorteilhaft. Im Rahmen der Optimierung werden im Allgemeinen bevorzugt mehr Rotationen in Kauf genommen, anstatt die Maschine anzuhalten und ein neues Werkzeug direkt einzupflegen. Das heißt, solange

$$t_{auf}^{\tilde{x}} + t_{zu}^{\tilde{x}} \geq t_r^{\tilde{x}} * n_r^{NCi} \quad (5.67)$$

gilt, werden bevorzugt „mehrere bis viele“ Rotationen zum nächsten Werkzeug durchgeführt, anstatt in einem freien Magazinplatz mit kürzerer Wechseldistanz ein neues Werkzeug einzupflegen¹⁷². Im Rahmen der Werkzeugmagazinkapazität $w_{kap} = 20$ ist dieser Sachverhalt zu vernachlässigen. Aber bei komplexeren und größeren Anlagen mit mehreren Hundert Plätzen und Werkzeugen kann dieser beschriebene Umstand ausschlaggebend für die Werkzeugmagazinbelegungsstrategie sein.

Insgesamt findet keine Überprüfung der Werkzeuglänge statt: Es kann in der praktischen Anwendung passieren, dass besonders lange Werkzeuge benötigt werden (z. B. Bohrer oder Fräser mit Übergröße), die sowohl bei der Magazinrotation als auch beim Anfahren des Nullpunkts problematisch sind. Wenn die Werkzeuglänge die Rotation des Magazins einschränkt, dann sollte dieses Werkzeug nicht zugelassen werden (Fehlplanung der Rüstung). Dieser Fall muss in der Arbeitsvorbereitung früh eine Berücksichtigung finden. Wenn die neue Werkzeuglängendimensionierung unvorteilhaft ausfällt, sodass beim Anfahren des Nullpunkts eine Kollision verursacht wird, wird dieses Werkzeug ausgeschlossen. Daraus könnte z. B. die Regel abgeleitet werden, dass bei einer Verwendung von überdimensionierten Werkzeugen eine Nullpunktanpassung (dynamische Nullpunktverschiebung) durchgeführt werden kann. Dies ist durch den Befehl für die Nullpunktverschiebung im NC-Programm möglich, sodass das NC-Programm diesbezüglich verbessert wird.

In dem Modell bleibt des Weiteren die Einhaltung der zulässigen Maximalmassegrenzen für das Werkzeugmagazin unberücksichtigt. Diese Restriktion kann eine verbesserte Startbelegungsstrategie ermöglichen, jedoch sind viele Magazine darauf ausgelegt, die Werkzeuge vollständig aufzunehmen, sodass dies nur einen Randbereich abbildet.

5.2.7 Formales Optimierungsmodell für eine Werkzeugpositionierung

Als weitere Ergänzung und Vergleichsgröße zum MWZW zur Werkzeugpositionierung kann das Werkzeugpositionierungsproblem durch ein lineares Optimierungsproblem ausgedrückt werden (LP). Dieses Modell verfolgt mit der Zielfunktion ebenfalls die mini-

¹⁷² Der Grund ist die unnötige Vermeidung von Fertigungsunterbrechungen und das Wiederanfahren der Maschine.

male Anzahl der Werkzeugplatzrotation, die sich durch die Anzahl der Werkzeugwechseloperationen und Distanzen zwischen den einzelnen Werkzeugplätzen ergibt, die bei jedem Werkzeugwechsel zurückgelegt werden müssen.¹⁷³

Mengen und Variablen:

Dieses Modell beinhaltet zunächst die Menge aller Werkzeuge WNC , die in ein Werkzeugmaschinenmagazin eingefügt werden. Die Anzahl der zur Verfügung stehenden Werkzeugplätze wird mit w_{kap} ausgedrückt und spiegelt die Kapazität eines Magazins wider.

Die Anzahl der zu belegenden Plätze im Magazin wird mit dem Parameter τ_S ausgedrückt. Die Anzahl der Werkzeugwechsel¹⁷⁴ des Werkzeugs i zu Werkzeug k ist mit λ_{ik} und die Distanz von Werkzeugplatz j zu Werkzeugplatz l ist mit dem Parameter e_{jl} definiert. Die Variable b_i gibt die Anzahl der belegten Werkzeugmagazinplätze durch ein Werkzeug i an und markiert damit auch Werkzeuge mit Übergröße, die quasi Nachbarplätze mitbesetzen.

Binärvariablen:

Die Variable x_{ij} besagt, ob das Werkzeug $i \in WNC$ auf dem Magazinplatz $j \in w_{kap}$ ist, und x_{kl} gibt an, ob Werkzeug $k \in WNC$ auf Magazinplatz $l \in w_{kap}$ angeordnet ist. x_{pq} gibt an, ob Werkzeug $p \in WNC$ dem Magazinplatz $q \in w_{kap}$ zugeordnet ist (in die Belegung eingerechnet wurde). Die Variable ω_{ij} ermöglicht die Modellierung alternativer Einschränkungen für einen Werkzeugmagazinplatzbedarf < 1 , d. h. betreffend der Werkzeuge, die mehr als einen Platz im Magazin benötigen. Die Variable y_{ijkl} ist eine Binärvariable, die zur Linearisierung der Zielfunktion führt und angibt, ob (gleichzeitig) das Werkzeug i auf dem Magazinplatz j liegt sowie Werkzeug k auf dem Platz l installiert ist.

Zielfunktion:

Die Zielfunktion, die zunächst durch eine bestimmte erzeugte Belegung die Verfahrswege für Werkzeugwechsel und Werkzeugwechselfdistancen minimiert, lautet wie folgt:

$$\min_y Z = \sum_{i \in WNC} \sum_{j \in w_{kap}} \sum_{k \in WNC \setminus \{i\}} \sum_{l \in w_{kap} \setminus \{j\}} \lambda_{ik} * e_{jl} * y_{ijkl} \quad (5.68)$$

Restriktionen:

$$x_{ij} - y_{ijkl} \geq 0 \quad \forall i, k \in WNC: i \neq k; \forall j, l \in w_{kap}: j \neq l \quad (5.69)$$

¹⁷³ Dieses Modell wurde auch für Lehrzwecke am Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. CIM am *Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn*, herangezogen und z. B. in der Arbeit von Aygün behandelt (vgl. [Ayg16]).

¹⁷⁴ Ausgehend von dem aktuellen NC-Programm.

$$x_{kl} - y_{ijkl} \geq 0 \quad \forall i, k \in WNC: i \neq k; \forall j, l \in w_{kap}: j \neq l \quad (5.70)$$

$$x_{ij} + x_{kl} - y_{ijkl} \leq 0 \quad \forall i, k \in WNC: i \neq k; \forall j, l \in w_{kap}: j \neq l \quad (5.71)$$

$$\sum_{i \in WNC} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in w_{kap} \quad (5.72)$$

$$\sum_{j \in w_{kap}} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in WNC \quad (5.73)$$

$$x_{00} = 1 \quad 0 \in WNC \quad 0 \in w_{kap} \quad (5.74)$$

$$\sum_{j=1}^{\frac{b_0-1}{2}} \sum_{p \in WNC} x_{pj} = 0 \quad 0 \in WNC \quad (5.75)$$

$$\sum_{j=\tau_s - \frac{b_0-1}{2}}^{\tau_s-1} \sum_{p \in WNC} x_{pj} = 0 \quad 0 \in WNC \quad (5.76)$$

$$x_{ij} = \omega_{ij} \quad \forall i \in WNC \setminus \{0\}: b_i > 1 \quad (5.77)$$

$$\forall j \in w_{kap}: j = \frac{b_0 + b_j}{2} \dots \tau_s - \frac{b_0 + b_j}{2}$$

$$\sum_{k=1}^{\frac{b_i-1}{2}} \sum_{p=1}^{\tau_s-1} x_{p(j+k)} \leq \frac{b_0 + b_j}{2} * (1 - \omega_{ij}) \quad \forall i \in WNC \setminus \{0\}: b_i > 1 \quad (5.78)$$

$$\forall j \in w_{kap}: j = \frac{b_0 + b_j}{2} \dots \tau_s - \frac{b_0 + b_j}{2}$$

$$\sum_{k=1}^{\frac{b_i-1}{2}} \sum_{p=1}^{\tau_s-1} x_{p(j-k)} \leq \frac{b_0 + b_j}{2} * (1 - \omega_{ij}) \quad \forall i \in WNC \setminus \{0\}: b_i > 1 \quad (5.79)$$

$$\forall j \in w_{kap}: j = \frac{b_0 + b_j}{2} \dots \tau_s - \frac{b_0 + b_j}{2}$$

$$x_{pq} \leq 1 - \omega_{ij} \quad \forall i \in WNC \setminus \{0\}: b_i > 1 \quad (5.80)$$

$$\forall j \in w_{kap}: j = \frac{b_0 + b_i}{2} \dots \tau_s - \frac{b_0 + b_i}{2}$$

$$\forall q \in w_{kap}: q = \frac{b_0 + 1}{2} \dots j - \frac{b_i + 1}{2}$$

$$\forall p \in WNC: b_p > K$$

$$K = 2 * (j - q) - b_i$$

$$x_{pq} \leq 1 - \omega_{ij} \quad \forall i \in WNC \setminus \{0\}: b_i > 1 \quad (5.81)$$

$$\forall j \in w_{kap}: j = \frac{b_0 + b_j}{2} \dots \tau_s - \frac{b_0 + b_j}{2}$$

$$\forall q \in w_{kap}: q = j + \frac{b_i + 1}{2} \dots \tau_s$$

$$- \frac{b_0 + 1}{2}$$

$$\forall p \in WNC: b_p > K$$

$$K = 2 * (q - j) - b_i$$

$$\sum_{j=\frac{b_0+b_i}{2}}^{\tau_s-\frac{b_0+b_i}{2}} \omega_{ij} = 1$$

$$\forall i \in WNC \setminus \{0\}: b_i > 1 \quad (5.82)$$

$$x_{ij}, x_{kl}, x_{pq}, \omega_{ij}, y_{ijkl} \geq 0 \quad (5.83)$$

$$x_{ij}, x_{kl}, x_{pq}, \omega_{ij}, y_{ijkl} \in \{0,1\} \quad \forall i, k \in WNC; \forall j, l \in w_{kap} \quad (5.84)$$

$$y_{ijkl} \in \mathbb{R} \quad (5.85)$$

Mit der vorgeschlagenen Werkzeugpositionierung, ausgehend von dem minimierten Zielfunktionswert Z_{min} aus Gleichung 5.68 und dem damit verbundenen Anzahl der Werkzeugwechsel λ_{ik} zwischen i und k sowie der erreichten Magazinrotationszahl, die sich aus den summierten Distanzen e_{jl} ergibt, ergibt sich nach Einsetzen in Gleichung 5.86 die Zeit aus der Gleichung 5.65: $t_{Werkzeug} = K(i)$, wodurch die Reduzierung von EZZ_{NC} erreicht wäre. Gleichung 5.86 ist hierbei eine für das formale Optimierungsmodell erweiterte Darstellung der Gleichung 5.62, wobei die Aussagen zwischen den Gleichungen 5.62 und 5.86 identisch bleiben:

$$K(i) = t_{Werkzeug}$$

$$= \left(\sum n_r^{NC_i}(e_{jl}) \right) * t_r + \left(\sum n_{tür,auf}^{NC_i} \right) * t_{auf} + \left(\sum n_{tür,zu}^{NC_i} \right) * t_{zu} + \left(\sum n_{aus}^{NC_i} \right) * \quad (5.86)$$

$$t_{aus} + \left(\sum n_{ein}^{NC_i} \right) * t_{ein} + \left(\sum n_{ww}^{NC_i}(\lambda_{ik}) \right) * t_{ww} + K_{Beschaffung}$$

5.2.8 Modellerweiterung zur Berücksichtigung der Standzeit und Reststandzeit von Werkzeugen

Die Werkzeugpositionierung erfordert neben der NC-befehlsabhängigen Positionierung der Werkzeuge auf Basis von Werkzeugmagazinen mit begrenzten Kapazitäten die Berücksichtigung von Standzeiten sowie Reststandzeiten nach jeweiligem Werkzeugeinsatz. Die Berücksichtigung der Standzeit erfordert eine kontinuierliche Datenerfassung. Im Kapitelverlauf sind im Wesentlichen die Prozesse *Drehen*, *Fräsen* und *Bohren* abgegrenzt. Die theoretischen Gegebenheiten sowie Annahmen werden exemplarisch anhand der Theorie aus dem Drehprozess hergeleitet und für Fräsen und Bohren die wesentlichen Unterschiede dargestellt. Die Herleitungen basieren dabei auf der Vorarbeit insb. durch *Dietrich* und *Tschätsch* (vgl. [DiTs14]).

In der theoretischen Betrachtung des Zusammenhangs von Prozessparametern in der Fertigung, wie z. B. der Schnittgeschwindigkeit v_c und der damit verbundenen Standzeit T eines Werkzeugs w , wird auf die Taylor-Gerade bzw. die erweiterte Taylor-Gerade hingewiesen (vgl. Kapitel 3.2.3). Damit geht einher, dass für jedes Werkzeug sowie jeden verbundenen Fertigungsprozess als Einzelnen (*Fräsen, Bohren, Drehen* inklusive Unterprozessen) auf Basis experimenteller Werkstoffkenngrößen eine mögliche Standzeit ermittelt wird und bestimmte Richtwerte von Werkzeugherstellern vorgegeben werden. Die Herstellerangaben sollten für einen reibungslosen Prozess und zur Erfüllung der zu erwartenden Standzeit und insb. zur Erreichung der üblichen Lebensdauer des Werkzeugs genutzt werden. In der Regel werden die einzustellenden Parameter von Seiten der Werkzeughersteller in Abhängigkeit bestimmter Faktoren wie z. B. geometrischer Daten des Werkzeugs, Art und Härte des Schneidstoffs sowie Art und Typ des zu bearbeitenden Werkstoffs durch Tabellenwerke oder Normen zur Verfügung gestellt.

Auch hat die Erfahrung der Maschinenbediener einen signifikanten Einfluss auf den Umgang mit dem Werkzeug. Mit steigender Komplexität des zu spanenden Werkstücks und der hohen Individualität der Werkstoffe und Werkzeuge muss ein hoher Anteil an verschiedenen Parametern verarbeitet werden. Aus Planersicht entsteht dadurch ein hoher Aufwand, bei dem das Restrisiko besteht, dass die Daten nicht bei jeder Anwendung zu den geschätzten Standzeiten und Lebensdauern führen. Die einzelnen fertigungsrelevanten Parameter sind theoretisch für jeden einzelnen Fertigungsschritt und jeden einzelnen Prozess im NC-Programm in die Maschinensteuerung zu programmieren. Jeder Fehler, der bei einer falschen Annahme einer Standzeit entsteht, pflanzt sich über die Nutzung des Werkzeugs w in dem Teilprozess i und der Rest-Standzeitberechnung fort.

Aus Planersicht und Verantwortung im Sinne der Arbeitsvorbereitung ist es notwendig, dass in einer Fertigungsschicht nur die Werkzeuge in das Magazin einer Werkzeugmaschine eingepflegt werden, die eine ausreichende Standzeit aufweisen. Des Weiteren sind sie für eingeplante Wartungsintervalle vorab aus dem Magazin zu entnehmen und ggf. durch Schwesterwerkzeuge (Zwillingswerkzeuge) zu ersetzen. Die Schwesterwerkzeuge sollten eine höhere Reststandzeit aufweisen als das entnommene Werkzeug. Das eigentliche Problem hierbei ist das sichere Berechnen von Standzeiten und Reststandzeiten, was modellhaft anhand der theoretischen Zusammenhänge (vgl. Kapitel 3.2.3) möglich ist, jedoch unter der Annahme einer ständigen unterschiedlichen Kombination von Schneidstoffen, Rohteilwerkstoffen und Prozess- und/oder Maschinenparametern für den Planer und auch für den Maschinenbediener einen hohen Aufwand erzeugt. Dieser Aufwand schlägt sich auch in der Verbesserung der Magazinbestückung nieder. Dabei stellt sich die Frage, welchem Magazinplatz einer Werkzeugmaschine (physikalischer Platz inklusive angepasster Programmierung der Anfangsbelegung) welches Werkzeug w zugeordnet wird, wenn jedem individuellen Werkzeug eine Standzeit bzw. Reststandzeit zugeordnet ist.

Die erste Lösung, die Werkzeuge nach den jeweiligen Schichten oder sogar Einzelfertigungsprogrammen vollständig aus dem Magazin auszutauschen, ist denkbar, kann aber

nicht die zufriedenstellende Lösung sein, da dies suggeriert, dass der Betrieb über ausreichend (gebundene) finanzielle Ressourcen verfügt, diesen Werkzeugbedarf auch für jede Maschine und jede Schicht für jeden Fertigungsschritt bzw. jedes NC-Programm zu decken. Vielmehr sollen dabei als Nebenbedingung die Wechselzeiten minimiert und unnötige Werkzeugwechsel vermieden werden. Zudem kann das Werkzeugmagazin eine für die Fertigung unzureichende Kapazität aufweisen, sodass während des Fertigungsprozesses Werkzeuge von außerhalb eingepflegt werden müssen. Sollte dieser umständliche Wechselzyklus auftreten, könnte dieser genutzt werden, um z. B. weitere Werkzeuge auszuwechseln, die als standzeitkritisch zu bewerten sind.

Unter der Betrachtung der angestrebten reduzierten Werkzeugwechselzyklen durch eine proaktive Werkzeugpositionierung im Werkzeugmagazin bleibt die Standzeit insgesamt nicht unbeachtet. Dabei ist der Strategiewechsel, ausgehend von der Bestrebung zur Berechnung von Standzeiten und Reststandzeiten während der Werkzeugnutzung bis zu einer im Vorhinein definierten Standzeit, die sich dann auf die Fertigungsparameter auswirkt, notwendig. Das bedeutet, dass die Werkzeuge durch informationsverarbeitende Maßnahmen mit den Fertigungsparametern versehen werden, die kompatibel zur Maschine sind und die (vom Werkzeughersteller) vordefinierte Standzeiten erfüllen. Die einzuwechselnden Werkzeuge erfahren einen Abgleich der Reststandzeit mit der Eingriffszeit aus dem NC-Programm, sodass unmittelbar Paradigmen zur Fertigung vorgegeben werden. Die daraus resultierende angestrebte Standzeit wird durch die Planung definiert bzw. in Richtwerttabellen durch Umrechnungen festgelegt (vgl. Tabelle 6 in Kapitel 3.2.3). Die daraus resultierenden Fertigungszeiten durch feste Parameter sind damit in der Gesamtschichtplanung zu berücksichtigen.

Bei den besagten Parametern handelt es sich um Schnittgeschwindigkeit v_c , Vorschubgeschwindigkeit v_f , Schnitttiefe a_p , Schnittbreite a_e , Vorschub f_z (Vorschub pro Schneide) und die Drehzahl n_c , die aus Tabellenwerken hervorgehen. Zur Konkretisierung des hier beschriebenen Sachverhalts, dient das nachfolgende Gedankenspiel, das exemplarisch in die allgemeinen Fertigungsprozesse Drehen, Fräsen und Bohren unterteilt ist.

5.2.8.1 Standzeitadäquates Arbeiten beim *Drehen*

Für die Identifikation von Fertigungsparametern, die an der Maschine für die Bearbeitung eines Fertigungsprozesses im Einzelnen bzw. durch das NC-Programm insgesamt erforderlich sind, ist die Taylor-Gerade als Modell zur Standzeitbestimmung bekannt. Die variierbare Größe beim Drehen ist hierbei der Zerspanungsquerschnitt A , der das Produkt von Schnitttiefe a_p und Vorschub f_{ist} (vgl. Kap. 3.2.3).

Wenn der Planer eine Standzeit vorgibt, die zeitlich in die Wartungsintervalle des Schichtplans passt, wird darauf basierend eine Werkzeugkurve ermittelt, die für eine konstante Standzeit $T = const.$ gilt. Die Werkzeugkurve gibt in Abhängigkeit des Spanquerschnitts A die Schnittgeschwindigkeit v_c vor. Solange die eingestellten Parameter für

$A = a_p * f$ zu einer Schnittgeschwindigkeit führen, die unterhalb der Werkzeugkurve mit $T = \text{const.}$ liegt, wird das Werkzeug nicht überlastet, und die Standzeit wird voraussichtlich eingehalten. Sollte $v_c(A)$ direkt auf der Geraden liegen, dann wird das Werkzeug für die zugrunde liegende Fertigungsoperation optimal ausgenutzt, und die vorgegebene Standzeitangabe wird nicht überschritten (bzw. unterschritten). Um die Arbeit mit Herstellerangaben und Tabellenwerken zu erleichtern, können A und v_c doppellogarithmisch auf die x - und y -Achsen aufgetragen werden. Dadurch ergibt sich die Werkzeuggerade $lg(v_c) = lg(f(A))$.

Für die Identifikation eines nutzbaren Arbeitsbereichs für Werkzeug und Werkzeugmaschine wird mit Hilfe der Gleichung

$$v_c = \frac{P * \eta_M}{a_p * f * k_c} \quad (5.87)$$

die Maschinen-Kurve definiert. Die Kurve gibt die Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit (y -Achse) vom Spannungsquerschnitt $A = a_p * f$ (x -Achse) bei konstanter Maschinenleistung an. Die Angaben der Antriebsleistung der Maschine P sowie der Maschinenwirkungsgrad sind herstellerspezifische bzw. maschinenspezifische Größen. Für die Maschinenkurve gilt $P = \text{const.}$

$$v_c = \frac{\eta_M}{a_p * f * k_c} \text{ bzw.} \quad (5.88)$$

$$v_c = \frac{1}{a_p * f * k_c} \quad (5.89)$$

In der Regel ist bei der Funktion noch zu beachten, dass Dimensionsfaktoren zur Verrechnung von physikalischen Einheiten berücksichtigt werden. Durch Logarithmieren der Achse wird die Maschinen-Kurve zur bekannten Maschinen-Geraden $lg(v_c) = lg(f(A))$. Die Maschinen-Gerade weist auf die Güte der gewählten Parameterkombination für A und der daraus folgenden v_c , Bezug nehmend auf die Ausnutzung der Antriebsleistung der Maschine, hin. Wenn A und v_c gewählt werden, sodass sie auf der identifizierten Geraden liegen, wird die angegebene Antriebsleistung ausgenutzt, was den optimalen Fall repräsentiert. Liegt die Parameterkombination unterhalb der Geraden, wird die Antriebsleistung der Maschine nicht vollständig genutzt (Verschwendung). Parameterkombinationen oberhalb der Maschinen-Geraden führen zu einer Überforderung des Maschinenantriebs.

Der optimale Arbeitspunkt, der die Antriebsleistung der Maschine und die Standzeit der Werkzeuge vollständig ausnutzt, liegt im Schnittpunkt der Maschinen- und Werkzeuggeraden. Daraus geht die optimale Einstellung von f hervor. Der theoretische Standzeitablauf für ein Werkzeug bei kontinuierlicher Nutzung der optimalen Parameter ist kalku-

lierbar, und Wartungszeiten sind genauer abschätzbar. Die Abbildung 27 zeigt zur Verdeutlichung den Schnittpunkt zwischen der Werkzeug- und Maschinen-Geraden als optimalen Arbeitspunkt.

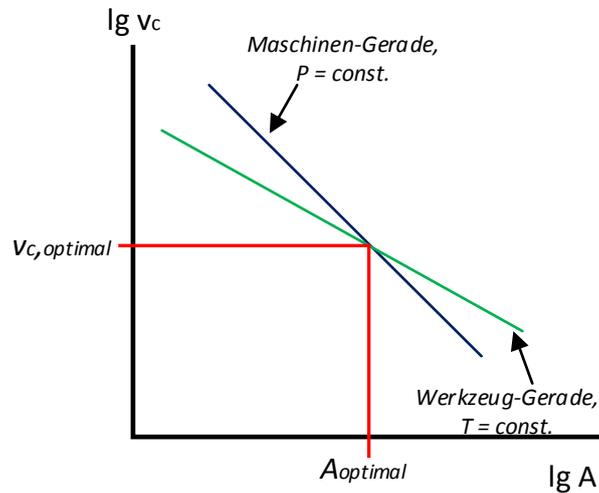


Abbildung 27: Ermittlung des optimalen Arbeitspunkts bei konstanter Antriebsleistung und definierter Standzeit

Dieser Schnittpunkt ist streng genommen prozessgebunden. Das bedeutet, dass Verarbeitungsprozesse, die der spanenden Fertigung zugeordnet sind, wie z. B. *Schlichten* und *Schruppen*, unterschiedliche Parameterkombinationen für A aufweisen können, die zu keinem Schnittpunkt der Geraden führen. Veranschaulicht wird dieser Fall durch die Abbildung 28 (vgl. [DiTs14]).

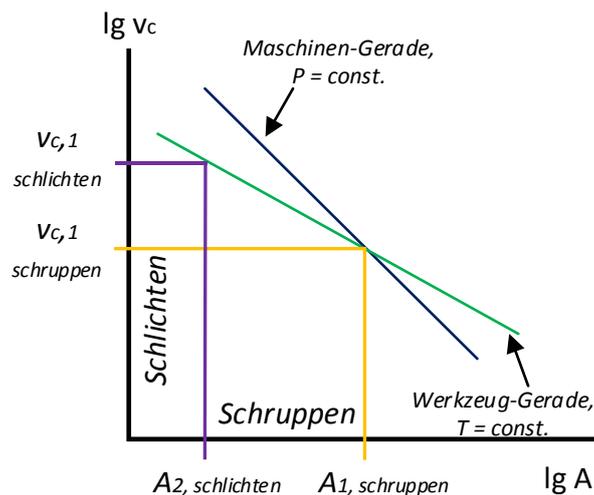


Abbildung 28: Interprozessoren Auswirkungen der Arbeitspunkte bei Nutzung gleicher Werkzeuge in verschiedenen Prozessen

Eine Konsequenz aus Abbildung 28 ist, dass für die Prozesse *Schlichten* und *Schruppen* zwei verschiedene Werkzeug-Geraden ermittelt werden, d. h. die Standzeiten T dahingehend definiert werden, dass zwei unterschiedliche Werkzeuge jeweils einem Prozess zugeordnet werden (was auch den Realfall abbildet). Dies führt unweigerlich zu einem vermehrten Werkzeugwechsel. Eine weitere Konsequenz ist die Anpassung der Schnittgeschwindigkeit v_c . Die dritte Möglichkeit ist eine kurzfristige Überforderung des Werkzeugs zulasten einer unkontrollierten Lebensdauer und ungenaueren Reststandzeit. Daraus ergeben sich Regeln, die prozessabhängig die Konfiguration von A und v_c steuern bzw. nachjustieren. Eine (vierte) Alternative ist eine nicht vollständig genutzte Antriebsleistung der Maschine. Aus dem erläuterten Fall mit den vier Alternativen geht als anzustrebende Strategie hervor, dass eine mögliche Überlagerung der Geraden angestrebt werden sollte, sodass die Werkzeuge optimal zu den Charakteristiken der zugrunde liegenden Werkzeugmaschine passen. Diese Überlagerung ist zunächst ein Modellgedanke und hängt von einer beachtlichen Anzahl unbekannter Größen, wie z. B. der Werkzeugdimensionierung, ab, sodass eine reale Umsetzung erschwert ist. Der dargestellte Kritikpunkt mit den Alternativen rechtfertigt eine informationstechnische Verbindung von Werkzeugen und zugeordneten Fertigungsparametern, die sich an der definierten Standzeit T orientieren. Diese Strategie wird anhand diverser Fertigungsleitstände verfolgt, bietet eine eingeschränkte aktive Optimierungsberücksichtigung bei der Magazinbestückung.

In Abbildung 27 wird verdeutlicht, dass für den Prozess *Schlichten* mit gleichem Werkzeug und verbundener Werkzeug-Geraden der Wert A so angepasst wird, dass durch die Schnittgeschwindigkeit $v_{c,schlichten}$ die Werkzeug-Gerade nicht überschritten wird. Dieser Sachverhalt kann sich während der Fertigung automatisch ergeben, sodass beim Prozess *Schlichten*, der eine feinere Oberflächenqualität des Werkstücks erbringen soll, die Schnitttiefe wesentlich geringer ist als beim *Schruppen* unter gleichbleibender Vorschubgeschwindigkeit. Dadurch wird $A = a_p * f$ herabgesetzt, und $v_{c,schlichten}$ erhöht sich. Unter Planungs- und Optimierungsgesichtspunkten ist das NC-Programm dahingehend zu überprüfen, ob der Vorschub f angepasst werden kann, um den optimalen Spannungsquerschnitt wieder zu erreichen. Als Konfigurationsmöglichkeit beim *Schruppen* ist die Schnitttiefe a_p zurückzunehmen und im gleichen Verhältnis der Vorschub zu erhöhen, um wiederum die Schnitttiefe zu erhöhen und den Vorschub gleichermaßen anzupassen. Analytisch lässt sich dieses Problem mithilfe der Ermittlung der Extremwerte über die partielle Differentialrechnung lösen, jedoch werden dabei keine weiteren schneidstoffspezifischen Gegebenheiten sowie Materialgesetze berücksichtigt.

Aus den Parametern, die sich zu den Werkzeug- und Maschinen-Geraden zusammensetzen, können sich theoretisch drei Fälle ergeben, die in Abbildung 29 gezeigt werden. Dabei können drei Fallunterscheidungen getroffen werden, die als Gedankenspiel kurz aufgegriffen werden:

Fall I: Der anzustrebende Arbeitsbereich liegt unterhalb der Werkzeug- und Maschinen-Geraden (1) und gewährt keine Überlastung des Werkzeugs und der Werkzeugmaschine. Solange die bestückten Werkzeuge mit in (1) liegenden Parametern genutzt werden, kann

die definierte Standzeit sicher in den Planungsprozess der Fertigung aufgenommen werden. Jedoch ist der Arbeitsbereich hierbei nicht optimal. Der optimale Arbeitsbereich liegt, wie bereits bekannt, im Schnittpunkt zwischen den beiden Geraden. Dieser Arbeitspunkt kann je nach Werkzeug und Werkzeugmaschine in das Prozessfenster *Schlichten*, *Schruppen* o. Ä. fallen.

Der markierte Bereich (2) beinhaltet Parameter, die die Werkzeuge überbeanspruchen, sodass die definierte Standzeit nicht eingehalten oder sogar die Lebensdauer des Werkzeugs überschritten wird (Dauerfestigkeit des Werkzeugs). Äquivalent ist dieser Zustand mit dem häufig auftretenden Problem bei der Bearbeitung von Werkstoffen, die für die spanende Bearbeitung nicht geeignet sind: Die Werkzeuge werden überbeansprucht, und die definierte Standzeit kann nicht eingehalten werden. Jedoch würden diese Gegebenheiten den Hinweis liefern, dass der ausgewählte Schneidstoff falsch gewählt wurde o. Ä. Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass für jedes zu bearbeitende Werkstück werkstoffabhängig und schneidstoffabhängig eine Werkzeug-Gerade ermittelt wird und der Verschleißfaktor zusätzlich zu beachten ist. Jeder Werkstoff hätte somit seine Auswirkung auf die Werkzeug-Gerade. Diese Wechselwirkungen zwischen Schneidstoff, Werkzeuggeometrien und zu bearbeitenden Werkstoffen sind durch empirische Versuche (Herstellerrangaben) aufzufangen. Ein äquivalenter Sachverhalt wird durch den Bereich (3) verdeutlicht. In diesem Bereich wird die Werkzeugmaschine mit der Bearbeitung überfordert. Bereich (4) führt demnach dazu, dass Werkzeug und Werkzeugmaschine mit der Bearbeitung gleichermaßen überfordert sind.

Fall II: Hierbei ergibt sich der theoretisch denkbare Fall, dass die Werkzeug- und Maschinen-Geraden genau aufeinanderliegen, was aus der Dimensionierung der Maschine (hauptsächlich Antriebsleistung) und der Gestaltung der Werkzeuge resultiert. Aus konstruktiver Sicht ist dieser Fall in der Realität sehr unwahrscheinlich, da die Werkzeuge und das zugrunde liegende Schneidmaterial nicht immer anhand der jeweilig einzusetzenden Maschine ausgelegt werden. Allein aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind die Werkzeug- und Werkzeugmaschinenhersteller daran interessiert, gegenseitig kompatible Produkte herzustellen – vor allem wenn beide Hersteller als identisches Unternehmen auftreten. Jedoch sind die Maschinen mit einer relativ hohen Antriebsleistung ausgestattet, sodass der Bereich einer schnellen Überdimensionierung von Seiten der Maschine im Vergleich zu den Werkzeugen vorliegt. Der Bereich (1) ist der gültige Bereich, in dem weder die Maschine noch das Werkzeug überlastet ist. Einen einzigen optimalen Arbeitsbereich gibt es hierbei nicht, vielmehr sind alle Parameterkombinationen, die auf den Geraden liegen, gleichermaßen optimal. Arbeiten im Bereich (2) würde die Werkzeuge und Maschinen überlasten. In dem theoretischen Fall II kann es vorkommen, dass bestimmte spanende Prozesse, wie z. B. das *Schruppen* (hoher Spanungsquerschnitt A bei geringerer Schnittgeschwindigkeit v_c), unmittelbar beide Systemelemente überlasten, was dazu führt, dass die Maschine und auch das Werkzeug für diesen Prozess insgesamt ungeeignet sind. Anderenfalls können *Schruppen* und *Schlichten* jeweils gültige Parameterkombinationen bilden, sodass das Werkzeug diese beiden Prozesse unter Einhaltung der Standzeit

durchführen kann. Der Fall II ist in Form eines wissenschaftlichen Gedankenspiels weiterzuverfolgen, da sich hier Hinweise ergeben können, inwiefern Werkzeuge verändert werden müssen, damit sie genau zu der Maschine passen, sodass Werkzeug- und Maschinen-Gerade übereinanderliegen. Auch können Lösungspotenziale identifiziert werden, die eine ständige Überdimensionierung von Maschinen vermeiden, was energie- und ressourcenschonend¹⁷⁵ ist.

Der **Fall III** bildet das Gegenstück zu Fall I. Die Bereiche (1) sind die möglichen bzw. (4) die ungünstigen Arbeitsbereiche. Bereich (2) repräsentiert hierbei die Parameterkombination, die zu einer Maschinenüberlastung führt, und der Bereich (3) führt zu einer Werkzeugüberlastung.

Die hier diskursiv dargestellten Sachverhalte gelten gleichermaßen für die Fertigungstechniken **Fräsen** und **Bohren**. In der Praxis tritt in der Regel der Fall I¹⁷⁶ auf, der für die hier betrachtete Verbesserung der Werkzeugpositionierung unter Beachtung definierter Standzeiten zugrunde gelegt wird. Der Fall II kann theoretisch mit der Frage, inwiefern sich die Werkzeuggestaltung verändern muss, weitergedacht werden, sodass die Geraden übereinanderliegen. Fall III wird nur der Vollständigkeit halber angeführt. Die Abbildung 29 veranschaulicht die drei Fälle.

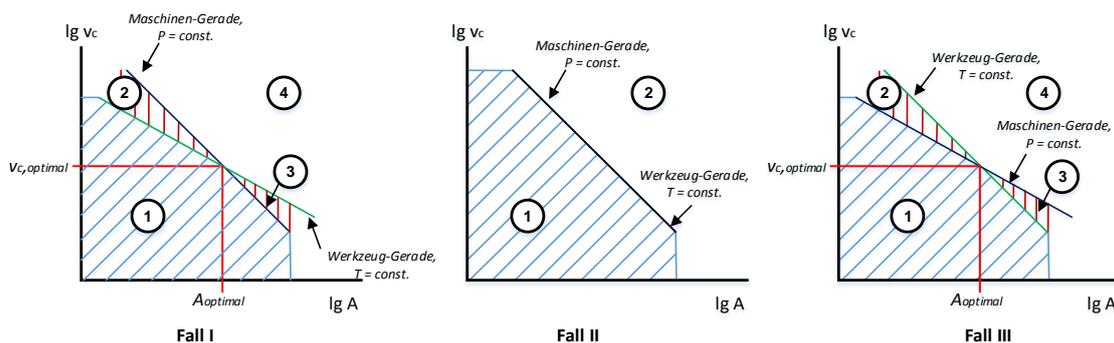


Abbildung 29: Theoretische Fallunterscheidung hinsichtlich der Werkzeug- und Maschinen-Geraden

5.2.8.2 Standzeitadäquates Arbeiten beim Fräsen

Die Standzeitüberwachung beim Fräsen ist unter Berücksichtigung von geringen Abweichungen der betrachteten Gleichungen äquivalent zu der „Dreh-Prozess-Betrachtung“ (vgl. Kapitel 5.2.8.1). Das Vorgehen zur Aufstellung von Werkzeug- und Maschinen-Geraden ist identisch. Die Werkzeug-Gerade ergibt sich aus herstellerspezifischen Tabellenwerken unter definierter Standzeit $T = const.$, und unter Berücksichtigung von Umrechnungsfaktoren der Schnittgeschwindigkeit wird die Standzeit T angepasst. Als Grundgleichung kann für den Fräsprozess ebenfalls die Maschinenleistung P der

¹⁷⁵ Antriebe weisen eine geringere Leistung auf. Der Bedarf an elektrischer und/oder mechanischer Energie wird ggf. reduziert. Diese trivial formulierten Folgen einer veränderten Maschinenauslegung sind in der Realität wesentlich komplexer, sodass hier nur vereinfachte Annahmen zugrunde gelegt werden.

¹⁷⁶ Dieser Fall wird in der Literatur überwiegend behandelt, so auch in [DiTs14].

Hauptspindel herangezogen werden, während sich die Werkzeug-Gerade aus Parametern der Tabellenwerke ergibt.

Für die Maschinen-Kurve, die durch logarithmierte Skalierung in die Maschinen-Gerade überführt wird, werden nachfolgend notwendige Modifizierungen aufgezeigt. Bestimmte Drallwinkel oder Zahnwinkel des Fräswerkzeugs werden nicht berücksichtigt bzw. als 1 angenommen. Aus weiteren Vereinfachungsgründen wird für die Berechnung des Zeit-spanvolumen herangezogen, bei dem B als Arbeitseingriff definiert ist und als Schnittbreite a_e angenommen wird. Die Variable $faktor_1$ ist ein Dimensionierungsfaktor und dient der Anpassung der Einheiten.

$$Q = \frac{a_p * B * v_f}{faktor_1} = \frac{a_p * a_e * v_f}{faktor_1} \quad (5.90)$$

Unter Berücksichtigung der Werkstoffkonstante K_{wk} , des Wirkungsgrads der Maschine η_M und eines Verfahrensfaktors f_{ver} gilt für die Antriebsleistung der Werkzeugmaschine

$$P = \frac{Q * f_{ver} * v_f}{K_{wk} * \eta_M} \quad (5.91)$$

Durch Einsetzen von 5.90 in 5.91 folgt

$$P = \frac{a_p * a_e * v_f * f_{ver}}{faktor_1 * \eta_M * K_{wk}} \quad (5.92)$$

Durch den Zusammenhang

$$v_f = f_z * z * \frac{v_c * faktor_2}{d * \pi}, \quad (5.93)$$

der in 5.92 eingesetzt wird, folgt für P

$$P = \frac{a_p * a_e * f_z * z * v_c * faktor_2 * f_{ver}}{faktor_1 * \eta_M * K_{wk} * d * \pi} \quad (5.94)$$

Durch Auflösen nach der Schnittgeschwindigkeit v_c folgt die Werkzeugkurve in Abhängigkeit von a_p und a_e sowie dem Produkt $f_z * z$:

$$v_c = \frac{P * faktor_1 * \eta_M * K_{wk} * d * \pi}{faktor_2 * f_{ver} * a_p * a_e * f_z * z} \quad (5.95)$$

Bei Vernachlässigung der Dimensionierung gilt die qualitative Gleichung

$$v_c = \frac{P * \eta_M * K_{wk} * d * \pi}{f_{ver} * a_p * a_e * f_z * z} \quad (5.96)$$

Aus Tabellenwerken sind Parameterkombinationen entnehmbar, die einer Überlastung von Werkzeug und Maschine unter Betrachtung der Schnittpunkte der zugehörigen Kurven vorbeugen. Die Tabellenwerke bieten z. T. einen Interpretationsspielraum für die Parameter. Für a_p ist ein fixer maximaler Wert in Abhängigkeit von den Herstellerangaben für das zugrunde liegende Werkzeug ablesbar, und es gilt $a_e = faktor * d$. (vgl. [Lan16-ol])

Wenn die Gleichung 5.96 durch Einsetzen von a_e modifiziert wird, kürzt sich d heraus, und es gilt

$$v_c = \frac{P * \eta_M * K_{wk} * \pi}{f_{ver} * a_p * faktor * f_z * z} , \quad (5.97)$$

wobei für $faktor \in Q$ und $0 < faktor \leq 1$ gilt.

Für die Betrachtung der Vorschubgeschwindigkeit, erfolgt ein Umformen der Gleichung 5.92

$$v_f = \frac{P * faktor_2 * \eta_M * K_{wk}}{a_p * a_e * f_{ver}} , \quad (5.98)$$

wobei für $f_{ver} = 1$ angenommen wird.

Wenn die oben hergeleitete Gleichung für die Maschinen-Kurve und die dazugehörigen Werkzeugparameter als Werkzeug-Kurve aus Tabellenwerken extrahiert werden, z. B. bei dem Werkzeug für *Planfräsen* aus [Lan16-ol], dann ergeben sich exemplarisch unter der Annahme, dass $P = const. = 10$ kW ist, die nachfolgenden Geraden (logarithmierte Skalierung) in Abbildung 30. A ist hierbei das Produkt aus a_p und a_e . Bei dem abgebildeten Kurvenpaar handelt es sich um ein praktisches Beispiel, basierend auf die vorangegangene Herleitung, bei dem die Werkzeug- und Maschinen-Kurve mit Tabellenwerten bestückt wurden.

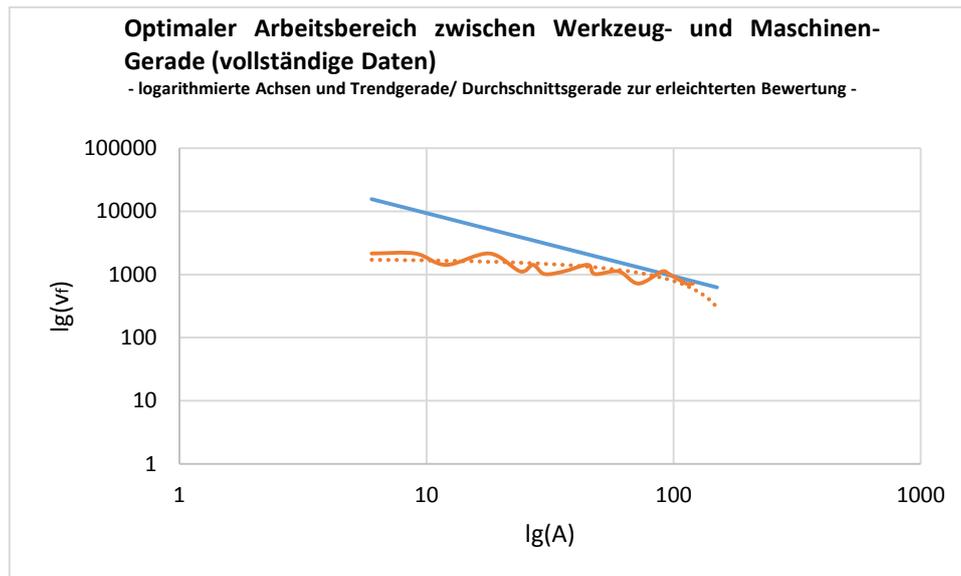


Abbildung 30: Maschinen- und Werkzeug-Geraden/Kurve anhand realer Parameter

Die orange Kurve¹⁷⁷ in Abbildung 30 bildet die Werkzeug-Kurve mit konstanter Standzeit T_{ab} , und die blaue Gerade repräsentiert die Maschinen-Gerade mit konstanter Leistung. Die schwingende Werkzeug-Kurve zeigt aufgrund der Herstellerangaben (vgl. [Lan16-ol], [Hof12], [GTS16-ol]) mehr als einen Schnittpunkt, was auf mehr als einen nahe-optimalen Arbeitsbereich hindeuten kann. Dies ist in der Modellsicht durch die geringen Differenzen der Schnittpunkte zueinander zu vernachlässigen, sodass nur ein Schnittpunkt ausgewählt und ein Restrisiko zugelassen wird. Es zeigt sich hier, dass das Modell allgemein für eine Abschätzung zur Einhaltung von Standzeit einen ersten Ansatz darstellt.

5.2.8.3 Standzeitadäquates Arbeiten beim *Bohren*

Für die Werkzeug-Kurve unter konstanter Antriebsleistung der Werkzeugmaschine wird, angelehnt an Kapitel 5.2.8.1 und 5.2.8.2, von der Gleichung für die allgemeine Antriebsleistung für den Bohrprozess ausgegangen:

$$P = \frac{M_{dreh} * n_c}{K_I * K_{II} * \eta_M} \quad (5.99)$$

M ist das Drehmoment an den Schnittkanten des Werkzeugs

$$M_{dreh} = F_c * \frac{d}{4} \quad (5.100)$$

¹⁷⁷ Durch den Rückgriff auf Tabellenwerke, die auf statistische Laborwerte basieren (Versuchsergebnisse) ist auch durch die logarithmierte Achsskalierung eine Kurve abgebildet. Die Kurve kann unter Inkaufnahme des Fehlers durch Glättungsverfahren zu einer Geraden approximiert werden.

mit F_c als Schnittkraft

$$F_c = A * k_c = a_p * f_z * k_c \quad (5.101)$$

und

$$A = a_p * f_z, \quad (5.102)$$

wobei a_p die Schnitttiefe definiert und f_z den Vorschub pro Schneide (Zahnkante am Bohrwerkzeug). Es gilt ferner

$$a_p = \frac{d}{2} \quad (5.103)$$

und

$$f_z = \frac{f}{z_E}. \quad (5.104)$$

f definiert den Vorschub des Werkzeugs und z_E die Anzahl der Schneidkanten, die sich im Eingriff befinden. Bei dem Bohrer sind in der Regel alle Schneiden im Eingriff, bzw. das Bohrwerkzeug besitzt die Schneidkante $z_E = z = 1$.

Durch Einsetzen von Gleichung 5.100 in Gleichung 5.99 ergibt sich:

$$P = \frac{a_p * f_z * k_c * d * n_c}{K_I * K_{II} * \eta_M * 4} \quad (5.105)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 5.103 und 5.104 in Gleichung 5.105 folgt:

$$P = \frac{f * k_c * d^2 * n_c}{K_I * K_{II} * z_E * \eta_M * 8} \quad (5.106)$$

Durch den Zusammenhang

$$v_c = \frac{d * \pi * n_c}{K_{III}} \quad (5.107)$$

kann Gleichung 5.107 nach d aufgelöst und in Gleichung 5.105 bzw. 5.106 eingesetzt werden, sodass für P gilt:

$$P = \frac{v_c * K_{III} * a_p * f * k_c}{4 * \pi * z * K_I * K_{II} * \eta_M} \quad (5.108)$$

Die Faktoren K_I , K_{II} und K_{III} sind als $K_I = \frac{2 * \pi * n_c}{K_{IV}}$ mit $K_{IV} = 60 \text{ s}/\text{min}$, $K_{II} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{kW}}$ und $K_{III} = 1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}$ definiert und dienen der Dimensionierung.

Durch Einsetzen von K_I ergibt sich

$$P = \frac{v_c * K_{III} * a_p * f * k_c}{8 * \pi^2 * z * n_c * K_{II} * \eta_M} \quad (5.109)$$

Nach Auflösen von Gleichung 5.109 nach v_c , ist die Maschinen-Kurve für den Prozess *Bohren* unter konstanter Antriebsleistung:

$$v_c = \frac{P * 8 * \pi^2 * z * n_c * K_{II} * \eta_M}{K_{III} * a_p * f * k_c * K_{IV}} \quad (5.110)$$

Durch $a_p = \frac{d}{2}$ ergibt sich:

$$v_c = \frac{P * 16 * \pi^2 * z * n_c * K_{II} * \eta_M}{K_{III} * d * f * k_c * K_{IV}} \quad (5.111)$$

Die x -Achsen der Werkzeug- und Maschinen-Geraden (vgl. Kapitel 5.2.8.1 als $A = a_p * f$ und Kapitel 5.2.8.2 als $A = a_p * a_e$) werden in Gleichung 5.111 durch das Produkt $d/2 * f$ abgebildet, der $A = a_p * f$ mit $a_p = d/2$ und $f = f_z * z$ beinhaltet. Für jedes Bohrwerkzeug ist die Schneidezahl konstant bei variierendem Durchmesser, sodass die Funktion v_c über das Produkt $d * f$ auf die x -Achse aufgetragen werden kann. Die Tabellenwerke bieten kompatible Herstellerangaben, sodass die Werkzeugkurve in Abhängigkeit vom Werkzeug für eine definierte Standzeit $T = \text{const.}$ erstellt werden kann. Für eine manuelle Analyse wird auch hier empfohlen, die Achsenskalierung zu logarithmieren, sodass die Kurven näherungsweise als Gerade abgebildet werden können ($\lg v_c = f(\lg(d * f))$).

5.2.8.4 Umsetzungskonzept zur Überprüfung der Standzeiten auf Basis der NC-Programme

Zur Überprüfung, ob die Werkzeugmaschine mit Werkzeugen ausgestattet ist, die zur Fertigung (in Abhängigkeit des NC-Programms) erforderlich sind und die Standzeit einhalten, wird auf Basis des Modells aus Kapitel 5.2.8 und der aus der Literatur bekannten Vorarbeit (vgl. [DiTs14]) geprüft, ob die jeweilige Eingriffszeit der Werkzeuge für die betreffenden NC-Sätze geringer ist als die Reststandzeit. Dazu wird für jedes Werkzeug die Eingriffszeit aus dem NC-Programm mittels NC-Parser-Applikation extrahiert. Die Reststandzeit muss dazu zwingend erfasst werden und eine definierte Standzeit sollte ebenfalls gegeben sein.

Sollte bei der Überprüfung des Datensatzes bzgl. der Werkzeugpositionierung (vgl. Kapitel 5.2) ein Werkzeug enthalten sein, dessen Eingriffszeit die Reststandzeit unter Standzeitbedingungen übersteigt, so ist dieses vor dem Fertigungsbeginn zu ersetzen oder ein alternatives Werkzeug im NC-Programm zu definieren. Das alternative Werkzeug muss mittels Werkzeugpositionierung im Magazin definiert und erfasst sein. Dieses Vorgehen ist für ein einzelnes NC-Programm bei einmaliger Fertigung nützlich. Bei mehrmaliger Nutzung des NC-Programms (mehrere Bauteile werden hergestellt, Betrachtung einer

Schicht/eines Arbeitstages) ist eine regelmäßige Überprüfung der Werkzeuge notwendig. Dadurch sind für jedes Aussortieren und Umordnen entsprechende Wartungszyklen einzuplanen und durchzuführen. Damit einhergehend ist die (Rest-)Standzeit nach jedem Wartungsvorgang wieder als Initialwert anzunehmen. Eine Lagervorrichtung ist zwingend notwendig, um die zu wartenden Werkzeuge zu speichern. Diese Lagervorrichtung weist im schlechtesten Fall¹⁷⁸ eine identische Kapazität auf wie die Lagervorrichtung, in der alle Werkzeuge außerhalb des Werkzeugmagazins gelagert werden. Dieser beschriebene Fall wird in der vorliegenden Arbeit nicht näher betrachtet, jedoch ist dieser für zukünftige Überlegungen einzubeziehen. Aktuell wird eine Lagereinheit mit einer unendlichen Kapazität vorausgesetzt. Für die konzeptuelle Umsetzung der Standzeitüberprüfung dient der nachfolgende Pseudocode 1:

¹⁷⁸ Der denkbar ungünstigste Fall wäre gegeben, wenn kein Werkzeug die Standzeit einhalten würde und sich alle alternativen Werkzeuge ebenfalls im Wartungszyklus befinden würden: Es könnte vorerst keine Fertigung stattfinden.

Allgemeiner Programmablauf:

```

do Initialisieren der Datenbank
    do Initialisiere Standzeitmodell // Informationen über CNC-Werkzeugma-
        schine, NC-Programm, Werkzeuge und spezifische Werkzeug- und Werk
        stoff-Kennwerte aus Tabellenwerken in DB aufbereitet

        Werkzeuge der Menge tools aus Werkzeugpositionierung mit
        Standzeit T versehen und erhalten T-Nummern:
         $T_{NC} := T_1, \dots, T_N$ 
        load initiale Standzeit  $T_{initial} = \{T, T_{Rest}\}$ 
        if  $t_{Einsatz\ seit\ Wartung\ in\ t-1}(T_N \in tools) > 0$  AND  $T \neq T_{Rest}$ 
            then  $t(T_N) = T_{Rest,t}$ 
            else  $t(T_N) = T$ 
        end
    end
do   Selektiere NC-Programm
        Selektiere NC-Parser-Applikation
        Execute NC-Parser-Applikation
end

Output T-Nummern  $T_{NC}$  aus NC-Programm als Menge  $tools(NC)$  Werkzeuge
repeat
    do Werkzeugauswahl  $T_1, \dots, T_N$ 
    do ausführen Simulation
        Simulation ermittelt  $t_{Einsatz,nc,w}$ 
        While  $T_{Rest} > t_{Einsatz,nc,w} = true$  do
             $T_N = T_N \in T_{NC}$  Werkzeugen und bleibt T-Nummer im
            NC-Programm zugewiesen
        end while
        if  $T_{Rest} \leq t_{Einsatz,nc,w}$  für  $T_N$ 
            replace  $id(T_N)$  in alternative  $id(T_k) \in tools$ 
        end if
    until  $T_{Rest}(T_{NC}) > t_{Einsatz,nc,w}(tools)$ 
end
for all  $T_{NC}$  do
    Bestätige Ergebnis
    Datenbank wird aktualisiert
end for

```

Pseudocode 1: Überprüfung der Standzeit der Werkzeuge

5.2.8.5 Kritische Bewertung zur Standzeitüberwachung der Werkzeuge

Durch Überprüfung des NC-Programms und Identifizierung der zu erwartenden Eingriffszeiten der Werkzeuge ist sichergestellt, dass im Rahmen der Werkzeugpositionie-

rung die geforderte Standzeit eingehalten wird: $T_w > t_{Einsatz,nc,w}$. Durch diese Überprüfung und Magazinbestückung werden Werkzeuge aus dem Magazin entnommen, deren Reststandzeit bei Entnahme einige wenige bis sogar viele Zeiteinheiten¹⁷⁹ über der gesamten Werkzeugeingriffszeit liegt, wodurch die Standzeit insgesamt nicht optimal (vollständig) ausgenutzt wird. Bei Betrachtung aller Werkzeuge kann dieser Sachverhalt vermehrt auftreten, sodass in den Wartungsintervallen zunehmend¹⁸⁰ Werkzeuge vorliegen werden und zunehmend Ersatz- bzw. Zwillingswerkzeuge bereitgestellt werden. Die Optimierung der Standzeitausnutzung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass für die Werkzeugpositionierung ausreichend Werkzeuge und Wartungskapazitäten vorliegen. Die Verwaltung, Lagerung und Wartungsprozesse für die Werkzeuge werden inhaltlich ebenfalls nicht explizit betrachtet. Des Weiteren muss beachtet werden, dass durch abweichende Prozesse, wie z. B. *Schlichten* oder *Schruppen* beim *Fräsen*, der theoretisch optimale Arbeitsbereich nicht erreicht, die geordnete Standzeit dennoch eingehalten werden kann. Die theoretische Modellbetrachtung der Werkzeug- und Maschinen-Gerade und der damit verfolgten Parameterüberwachung geht davon aus, dass eine Antriebsleistung der Maschine gilt. Reale Maschinen können jedoch mehrere Antriebskomponenten für die Spindel haben, sodass eine Fehlinterpretation möglich ist, sodass bei diesem Ansatz immer beachten werden muss, dass vereinfachte Annahmen gelten.

5.2.8.6 Datenerfassung von Fertigungsparametern zur Einhaltung der Standzeiten und nachhaltiger Werkstückpositionierung

Um die Arbeitsbereiche auch unabhängig von den gegebenen Tabellenwerten abzuschätzen und vorab festgelegte Standzeiten einzuhalten, sind fertigungsrelevante Parameter in einer Datenbank (Datenhaltung) zu speichern. Diese Daten basieren auf herstellerebene Tabellenwerken. Insbesondere werkzeug-, schneidstoff- und werkstoffspezifische Angaben sind in Form eines hohen Datenbestands zu identifizieren und für zukünftige Anwendungen zu speichern. Die Parameter für das jeweilige Fertigungsvorhaben sind durch Verknüpfungen der Daten automatisch anwählbar, und in Verbindung mit der Einhaltung von Grenzen und Regeln, die sich aus den Werkzeug- und Werkzeugmaschinen-Geraden ergeben, kann standzeitadäquat eine Werkzeugmagazinbestückung erfolgen. Ein exemplarisches relationales Datenbankmodell (*Entity-Relationship-Modell*) ist in Abbildung 31 für die spanende Fertigung *Drehen* dargestellt.

Für die reine Überprüfung und für den Abgleich zwischen Eingriffs- sowie (Rest-)Standzeit ist ein weniger komplexes Datenbankmodell notwendig. Auch sollte bei komplexen Datenbankmodellen, insb. bei einer umfangreichen Auftrags- und Fertigungsstruktur,

¹⁷⁹ Dieser Sachverhalt hängt von den nachfolgenden NC-Programmen, genauer zukünftige Werkzeugeingriffszeiten ab und ist deterministisch, wenn die Folgeaufträge bekannt sind. Ggf. kann auf Basis von Vergangenheitsdaten oder Ansätze aus dem Bereich „Machine Learning“ eine verbesserte Planungssicherheit geschaffen werden. Dies wird in der Arbeit nicht weiter verfolgt.

¹⁸⁰ Es werden möglicherweise mehr Werkzeuge der Wartungseinheit hinzugefügt als wieder zurück in die Lagereinheit bzw. in das Werkzeugmagazin gelangen.

eine Normierung stattfinden, um Redundanzen zu vermeiden. Dies ist im Rahmen der Arbeit nicht zwingend notwendig, da hier das technische Konzept mit weniger umfangreichen Anwendungsfällen aufgezeigt wird und keine komplexere Inbetriebnahme in der Realfertigung erfolgt.

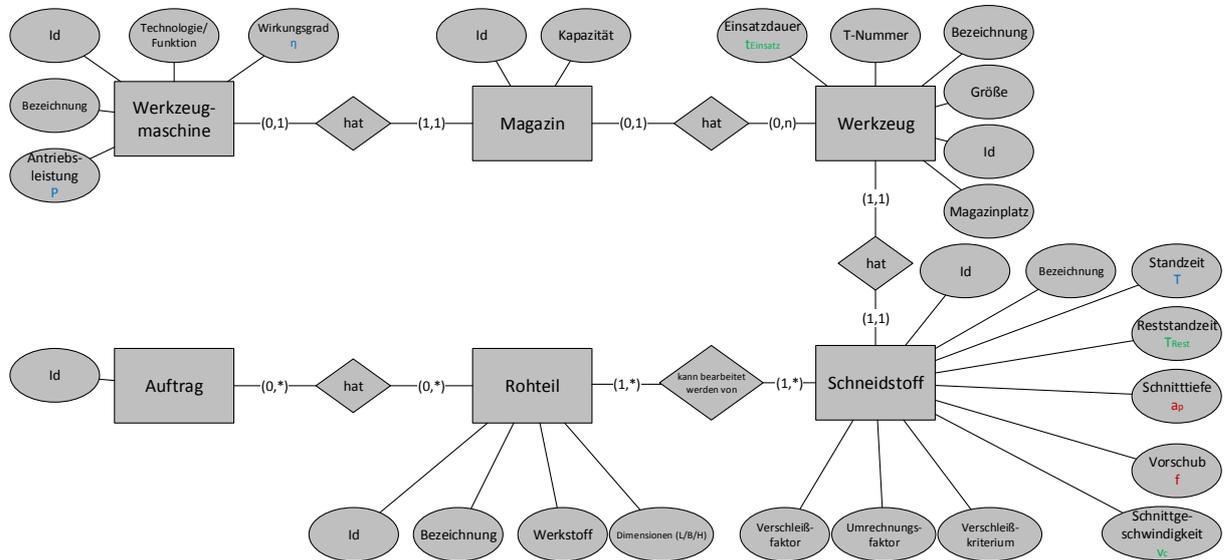


Abbildung 31: Relationales Datenbankmodell zur Fertigungsparameterüberwachung und Einhaltung der Standzeit am Beispiel Drehen

Wie bereits in Kapitel 5.2.8.1 erläutert, lassen sich Parameter-Kombinationen von Schnitttiefe und Vorschub in Abhängigkeit von einem Rohteilwerk- und Schneidstoff in eine einzustellende Schnittgeschwindigkeit überführen ohne eine Überlastung von Werkzeug und Maschine zu erzeugen. Im Rahmen der Arbeitsplanung sind neben der Planung von Arbeitsschichten auf Grundlage der Standzeiten ausreichend Wartungsintervalle einzurichten. Sobald eine Standzeit T definiert ist, kann das Werkzeug in Abhängigkeit von der Haupteingriffszeit, die aus dem NC-Programm hervorgeht, entsprechend in das Magazin einer Maschine positioniert werden. Ungewollte Ausbavorgänge während eines Fertigungsauftrags werden bestenfalls vermieden, solange die definierte Standzeit nicht überschritten wird. Nach jedem Einsatz des jeweiligen Werkzeugs wird die Standzeit pro Werkzeug automatisch mitgeführt und die Einsatzzeit jeweils subtrahiert:

$$T_{Rest} = T - t_{Einsatz,nc,w} \quad (5.112)$$

In der Periode $t=0$, die den Zeitpunkt der Werkzeuganschaffung bzw. die Schneidstoffwartung beschreibt, wird die dafür definierte Standzeit wieder mit der Reststandzeit gleichgesetzt: $T = T_{Rest}$. Durch unvorhersehbare oder zufällige Ereignisse kann trotzdem eine Werkzeugbeschädigung auftreten, die nicht vollständig vermeidbar ist (Restrisiko).

Die Wechselbedingung ist durch einen definierten Grenzwert festgelegt, der für einen Werkzeugaustausch durch die Hauptzeit der Werkzeugeingriffe überschritten wird:

$$t_{\text{wechselzeitpunkt},T} = t_H > t_{\text{Grenz}} \quad (5.113)$$

Wobei sich t_{Grenz} als Summe der Eingriffszeiten des Werkzeugs während des NC-Programms ergibt

$$t_{\text{Grenz}} = \sum_{i=1}^I t_{\text{Einsatz},nc,w}(v_c, a_p, f) \quad (5.114)$$

Es gilt ferner $t_{\text{Grenz}} < T$.

Die für eine standzeitadäquate Fertigung identifizierte Kombination aus Schnitttiefe a_p und Vorschub f , die zu einer Schnittgeschwindigkeit v_c führt (Abbildung 31 markiert in Rot und Grün), belastet passgenau den Schneidstoff, sodass T eingehalten wird. Die definierte Standzeit T , der Wirkungsgrad η der Maschine sowie die Antriebsleistung P sind in Blau markiert (vgl. Abbildung 31). Die fertigungsabhängige Eingriffszeit des Werkzeugs t_{Einsatz} und die zu errechnende Reststandzeit T_{Rest} sind in Abbildung 31 grün markiert.

Streng genommen werden im komplexeren mehrdimensionalen Fall, d. h. für alle Ψ Maschinen eines Maschinenparks und T_w Werkzeuge mit zugehörigen $scut$ Schneidstoffen, fallabhängige Werkzeug- respektive Maschinen-Geraden betrachtet. Eine computergestützte „Trackingumgebung“ mittels Datenbank und NC-Parser-Applikation steht hierzu außer Frage. Durch den Einsatzplan eines Werkzeugs bzw. die Berücksichtigung der Positionierung in Abhängigkeit von Standzeit T als Vorauswahl sowie der nebenzeitreduzierenden (zykluszeitreduzierenden) Magazinposition sind Einstellempfehlungen für v_c identifizierbar. Konkret bedeutet das z. B. für den Prozess *Drehen*:

Bei einem Drehteil sind neben der Auswahl des Rohteils (Werkstoff) und der Werkzeuge (Schneidstoffe) Vorschub und Schnitttiefe prozessabhängig auswählbar. Die darauf basierende Verknüpfung der Datenbanktabellen (Datenbankbeziehung) führt zur Schnittgeschwindigkeit für die definierte Standzeit T .

Sobald die *Fertigungssession* definiert ist, werden die jeweiligen Fertigungsparameter durch die Parameter aus der zugehörigen Tabelle unter $T = const.$ ausgewählt und bei der Magazinbestückung berücksichtigt. Durch die NC-Parser-Applikation ausgegebene Zykluszeit wird die Einsatzzeit (Eingriffszeit) der Werkzeuge während des gesamten NC-Programms identifiziert. Mittels Zuordnung der Werkzeugnummern (T-Nummern) zu den berechneten Werkzeugpfaden (Zykluszeiten) ergibt sich die Hauptzeit eines jeden Werkzeugs, die von der gegebenen Standzeit T bzw. T_{Rest} subtrahiert wird. Die Subtraktion resultiert aus dem letzten Eingriff $i-1$ des Werkzeugs. Die Erfassung findet in der Tabelle *Werkzeug* unter der entsprechenden ID (hier T-Nummer) statt. Durch das automatische Extrahieren der T-Nummern im NC-Programm sind die IDs der Werkzeuge bekannt sowie zugehörige Randdaten und auch Standzeiten. Ebenso können Drehzahl und Vorschubinformatoren extrahiert werden.

Das Datenbankmodell für den Fertigungsprozess Drehen muss hier sekundär betrachtet werden, da im Bereich *Fräsen* nur bestimmte Werkzeugmaschinen Dreharbeiten vollziehen können. Beim *Fräsen* können allerdings Bohrprozesse sowie Gewindeschneidprozesse eingebunden werden. Natürlich kann das Gewindeschneiden auch im Bereich der drehenden Fertigung betrachtet werden, was äquivalent zum standardisierten Drehprozess ist: Beim Gewindedrehen wird das Werkzeug mit der Schneide unter entsprechender Winkel- und Vorschubeinstellung an ein rotierendes Werkstück geführt. Dieser Prozess ist also in abstrahierter Form mit einem standardisierten Drehprozess gleichsetzbar.

Im Bereich des Fertigungsprozesses *Fräsen* ist das Datenbankmodell marginal anzupassen. Aufgrund der äquivalenten Betrachtung zu Kapitel 5.2.8.1 ist in Kapitel 5.2.8.2 die Formel für die Maschinen-Gerade verändert worden (vgl. Gleichungen 5.87 und 5.98). Die Änderungen sind als Attribute der Entitäten *Schneidstoff* (Hinzufügen von Schnittbreite a_e , Vorschub f_z pro Fräserzahn am Werkzeug) und *Werkzeug* (Hinzufügen von Werkzeugdurchmesser d) vorzufinden. Die Schnittbreite hängt von d bzw. den Werkzeuggeometrien an der Schneide ab. Diese Änderungen sind in der Abbildung 32 umrandet markiert.

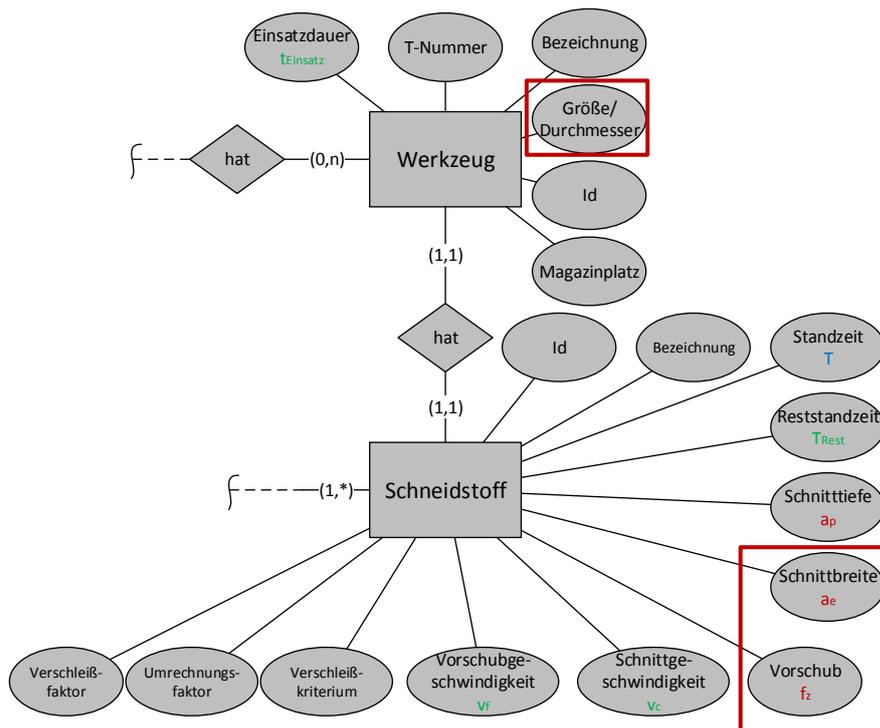


Abbildung 32: Datenbankmodellausschnitt zur Anpassung der Datenstruktur für den Prozess *Fräsen*

Der Modellausschnitt der Datenbank für den Bohrprozess zeigt, dass das Werkzeug selbst den Schneidstoff¹⁸¹ bildet. Die relevanten Veränderlichen für die Werkzeug- und Maschinenkurve sind in Abbildung 33 umrandet und finden sich auch in Tabellenwerken wieder. Auch hier wird im Rahmen einer zunehmenden Modellkomplexität eine Normierung der Datenbank empfohlen, um Redundanzen zu vermeiden.

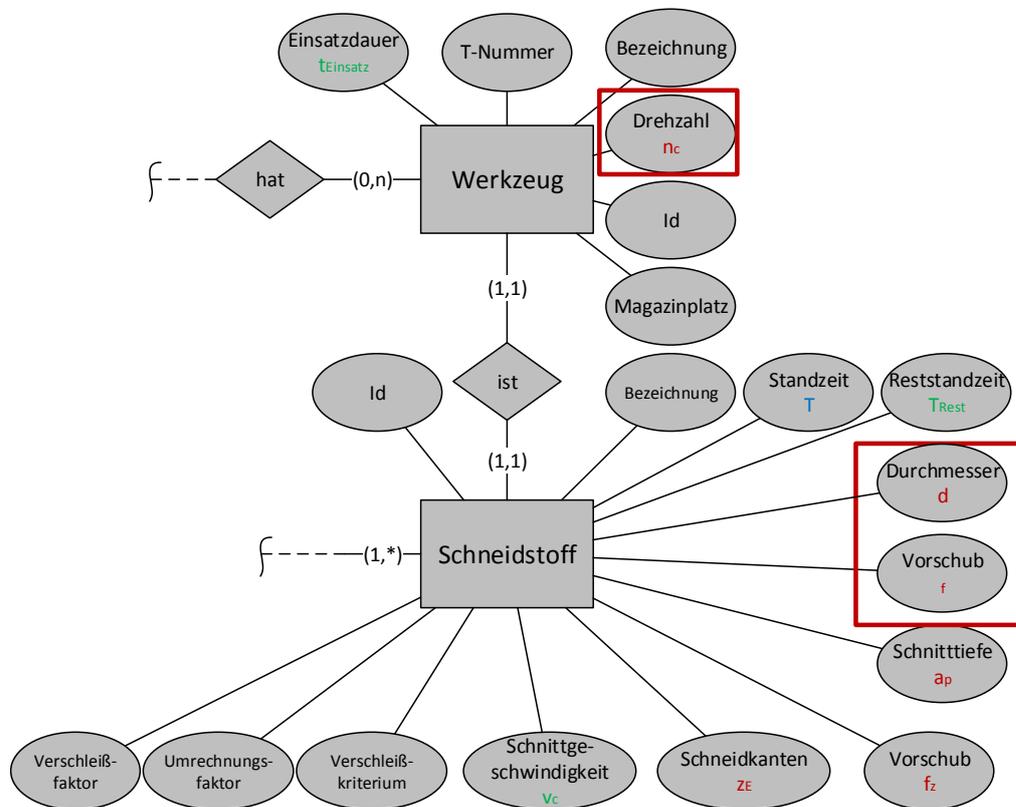


Abbildung 33: Datenbankmodellausschnitt zur Anpassung der Datenstruktur für den Prozess Bohren

¹⁸¹ Die Schneide selbst kann durch besondere Legierungen oder Beschichtungen andersartig sein als der Grundwerkstoff des Werkzeugs, was für die vorliegende Arbeit zunächst irrelevant ist und der Vereinfachung halber nicht berücksichtigt wird.

6 Umsetzung der Konzepte anhand einer Benutzerschnittstelle

6.1 Schnittstellen zur Ansteuerung und Verwaltung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung

Zur individuellen Auftragsverwaltung und Bedienung wird als Schnittstelle eine webbasierte Bedieneroberfläche implementiert (GUI – **g**rafical **u**ser **i**nterface). Damit mehrere Nutzer innerhalb und außerhalb einer Organisation das Aufspannverfahren I sowie die Werkzeugpositionierung ansteuern können, wird der Zugriff durch eine Anmeldung unter Verwendung eines Nutzernamens und eines spezifischen (verschlüsselten) Kennworts gewährt. Jeder individuelle Nutzer greift auf eine eigene nutzerspezifische Datenbank zu, sodass die Charakteristika einer Dienstleistungsplattform gegeben sind und zudem eine flexible, ortsungebundene Nutzung ermöglicht wird.

Die Bedieneroberfläche ist in Reiter aufgeteilt. Im Sinne eines *Workflows* werden sukzessiv vom Anlegen neuer Aufträge bis hin zum Ansteuern der Werkstück- und Werkzeugpositionierung einzelne Reiter abgearbeitet. Die Eingabedaten werden in eine SQL-Datenbank abgelegt. Diese Datenbank bildet auch die Schnittstelle für die gesamte Datenverwaltung, im Speziellen für die Verwaltung der VMDE-Dateien, die die geprüften Parameter der Werkstückpositionierung enthalten (vgl. [Wei11]).

Die Bedieneroberfläche ist als Webseitenformat gestaltet und wurde durch die Programmiersprachen *HTML 5.0* und *Javascript* entwickelt. Die Datenbanken wurden mit *mySQL* entwickelt und über *PHP-Schnittstellen* mit der Bedieneroberfläche verbunden. Die Abbildung 34 zeigt einen Ausschnitt des Anmeldebereichs, der Auftragseingabemaske sowie die Maske für die Festlegung von Fertigungsschritten. Der Reiter *VMDE Workflow* beinhaltet die Steuerung des Aufspannverfahrens I für die Werkstück- sowie die Werkzeugpositionierung.

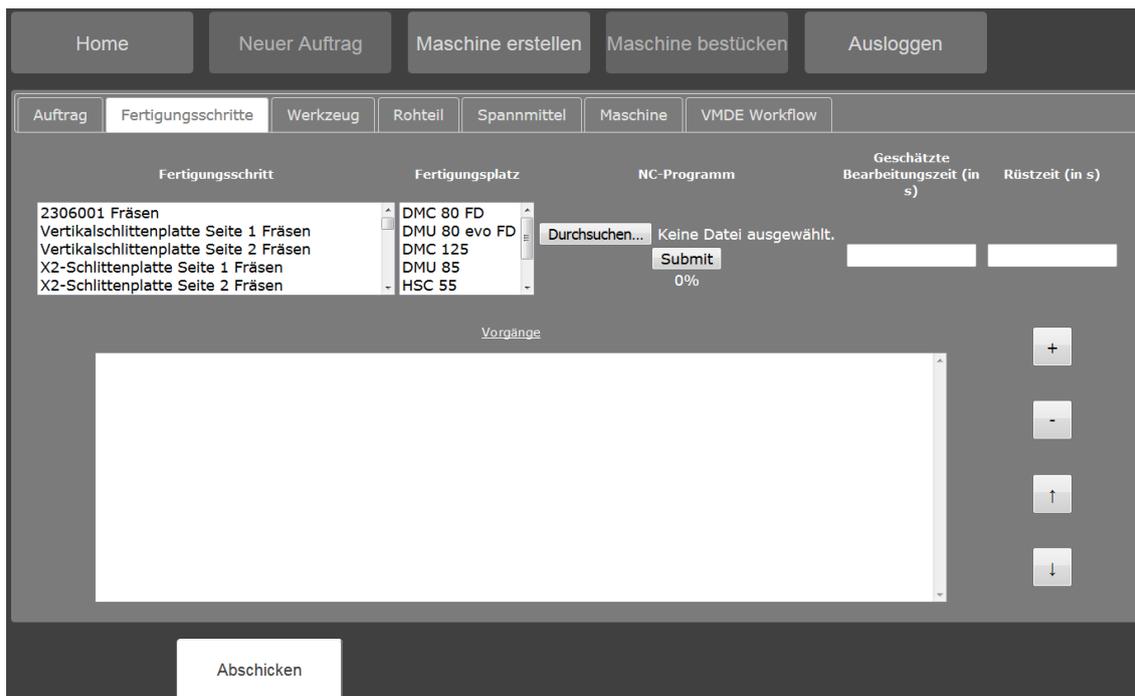


Abbildung 34: Exemplarische Auswahl der Masken der Benutzerschnittstelle

Im unteren Bereich der Abbildung 34 werden die Arbeitsschritte angegeben. Der zugehörige Arbeitsplatz bzw. die Maschine wird dem Auftrag zugeordnet. Nach der Definition von Rohteil (Eingabe geometrischer Daten) und Spannmittelauswahl kann im VMDE-Workflow-Fenster die Eingabe zu einem neuen Optimierungsauftrag bzgl. der Werkstückpositionierung gestartet werden. Dies umfasst die automatische Extraktion der gewünschten VMDE-Datei sowie des NC-Programms durch die NC-Parser-Applikation inklusive der Abschätzung von Zykluszeit und Werkzeugeingriffszeit. Die Funktion, bestehende Daten aus der Datenbank herunterzuladen und äquivalent zu verwenden, ist ebenfalls gegeben.

Workflow zur Auftragserstellung durch die Benutzeroberfläche:

Über die Benutzeroberfläche (GUI), wie sie auszugsweise in Abbildung 34 dargestellt wird, hinterlegt der Nutzer Angaben zu seinem Auftragsvorhaben: Daten für eine zweifelsfreie Auftragsidentifizierung werden definiert, sodass die Verbesserung der Aufspannposition von Werkstücken erfolgreich durchgeführt wird.

Eine Übersicht über den allgemeinen Prozess zur Auftragserstellung ist in dem Flussdiagramm in Abbildung 35 dargestellt. Es veranschaulicht hier die Erstellung eines Standardauftrages¹⁸², bei dem neben Termine, Kosten auch die Rohteile, Spannmittel und ggf. alternative Werkzeugmaschinen auszuwählen sind.¹⁸³ Neben der Möglichkeit, sukzessiv

¹⁸² Mit Standardauftrag ist der industrielle Fertigungsauftrag gemeint, den produzierende Unternehmen und Dienstleister unter Angaben von Produktbezeichnungen, Auftragsnummern, Liefermenge, Zeiten, Material, Maschinenspezifika usw. definieren

¹⁸³ Die Teile der GUI für die Auftragsdefinition, Termine und Kosten sind in Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. CIM des Heinz Nixdorf Instituts und des Decision Support &

einen Standardauftrag zu erstellen, ist die zweite Möglichkeit der VMDE-Auftrag (VMDE-Workflow). Bei dem VMDE-Auftrag sind bereits vorhandene Datensätze aus der Datenbank aus früheren Simulationsläufen (*Sessions*), wie z. B. Rohteildaten, Spannmitteldaten, Aufspannkoordinaten, Werkzeuge und NC-Programme abrufbar und können für eine neue Werkstückpositionierung extrahiert werden. Dazu können entweder bestehende VMDE-Dateien mit vorhandenen Datensätzen versehen werden, oder es wird unter Angaben zu den einzelnen Entitäten eine (neue) VMDE-Datei generiert (*VMDE-composing*).

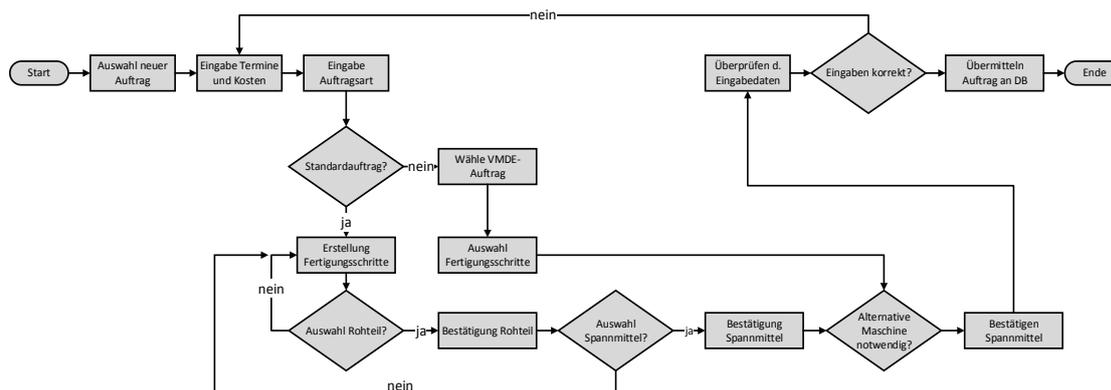


Abbildung 35: Flussdiagramm über den Eingabeprozess zur Ansteuerung der Auftragsdefinition und Werkstückpositionierung

Die Benutzerschnittstelle in Form der Webseite ist eine flexible Lösung, die an jedem browserfähigen Endgerät aufgerufen werden kann. Der für die durchgängige Benutzerschnittstelle hinterlegte Workflow wurde ebenfalls als Kollaborationsplattform (MSSP) implementiert.

Benutzerschnittstelle mithilfe von MSSP:

Für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung sowie zur Einpflege von vorausgehenden Aufträgen ist ebenfalls eine *Web-Applikation* notwendig, die z. B. für jeden Workflow-Schritt (angelehnt an den VMDE-Workflow) eine eigene Webseite mit Listen und Bibliotheken beinhaltet. Die Abbildung 36 zeigt exemplarisch einen Entwurf einer Webseite als Auftragsworkflow aus dem zugrunde liegenden Forschungsprojekt.¹⁸⁴ Mithilfe dieser Webseite können z. B. Auftragstermine in Kalenderform, andere Listenelemente oder Objekte eingetragen werden.

Operations Research Lab der Universität Paderborn im Rahmen des Forschungsprojekts *InVorMa* des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL* entstanden.

¹⁸⁴ Das Forschungsprojekt *InVorMa* des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL* diente zur Umsetzung und Evaluation der vorliegenden Forschungsarbeit und wurde vom Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, insb. CIM, an der Universität Paderborn mitgestaltet.

Abbildung 36: Darstellung der Auftragsverwaltung und Werkstückpositionierung im MSSP

Ebenfalls sind Daten für die Rohteil- und Spannmittel definierbar. Die Auftragsdaten werden in einer SQL-Datenbank (*MS SQL-Server*) abgelegt und sind dort mit der Event-Tabelle (vgl. Kapitel 6.2.1.2, Abbildung 42) verknüpft. Bei der Anbindung einer externen Datenbank wurden hierbei Defizite identifiziert, sodass diese wegen Inkompatibilitäten zwischen der Programmiersprache für *MS SQL-Server* und der standardisierten Programmiersprache für SQL nicht eins-zu-eins migriert werden konnten. Durch die speziellen Randbedingungen durch das Forschungsprojekt *InVorMa* sind entweder aufwendige externe Applikationen notwendig, die die Kompatibilität gewährleisten, oder die externe SQL-Datenbank muss in eine MS SQL-Datenbank konvertiert werden. Wenn von Organisationen zur Führung des operativen Geschäfts aus strategischer Sicht überwiegend Software-Produkte der *Firma Microsoft Corporation* genutzt werden, ist es sinnvoll, die Datenbanken in das MS-Server-System zu überführen. Dafür gibt es Programme wie z. B. SSMA (*SQL Server Migration Assistant*), die den Server der externen Datenbank mit dem MS SQL-Server verbinden. Im Anschluss kann der Nutzer die Tabellen auswählen, die auf dem MS SQL-Server migriert werden sollen.

Kritisch zu bewerten ist, dass die Daten bzw. die elektronische Datenverwaltung an eine unternehmerische Organisation und deren Format gebunden sind und es aus betriebswirtschaftlicher Sicht zu gewährleisten ist, dass für zukünftige Geschäftsperioden und Planungshorizonte die Anwendungen/Softwareprodukte der zugrunde liegenden Organisation weiterhin für das operative Geschäft verwendet werden, was nicht immer garantiert werden kann. In diesem Kontext bleiben die Logik der Datenbank bzw. die Aufbaustrukturen unverändert. Es verändert sich lediglich die Programmiersprache, mit der die Tabellen, Relationen und Entitäten erstellt und verwaltet werden. Auf der anderen Seite steht ein geschlossenes System zur Verfügung.

Ferner ist es nicht möglich, das Aufspannverfahren I innerhalb der MSSP-Umgebung vollständig durchzuführen, insb. können Applikationen wie die vWZM oder die NC-Par-

ser-Applikation nicht fehlerfrei angesteuert werden. Diese Randbedingung sowie die bedingte Kompatibilität der SQL-Datenbank sind durch den ersten Pilotfall, ausgehend vom Forschungsprojekt *InVorMa*, gegeben. Die NC-Parser-Applikation kann lokal in der Nutzerumgebung im *MSSP-System* abgelegt (in einem Ordner oder in einer Liste) und von dort auf einen lokalen Rechner durch vorheriges Herunterladen ausgeführt bzw. auf dem Server selbst ausgeführt werden. Allerdings ist dies ohne weitere Zusatzapplikation und weiteren Programmieraufwand nicht automatisierbar. Auch besteht derzeit noch keine externe Ansteuerung der vWZM auf Basis der *MSSP-Umgebung*, sodass der hier entwickelte Ansatz zwar für die Datenhaltung ausreichend, jedoch nicht dynamisch ist, um eine kontinuierliche Werkstückposition zu prüfen oder zu verbessern. Eine Kommunikation von *MSSP* mit externen Applikationen wird derzeit mittels *Web Services* unter Verwendung standardisierter Protokolle ermöglicht (vgl. Kapitel 3.3).

6.2 Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkstückpositionierung

Die Ergebnisse der Werkstückpositionierung, die zu einer reduzierten Zykluszeit führen, sind Schwerpunkt des Kapitels 6.2. Für Details zu den verwendeten programmiertechnischen Werkzeugen sowie Rechnerressourcen sei auf Anhang A1.4 verwiesen. Die erste Phase des Aufspannverfahrens I zeigt insgesamt ein brauchbares Konvergenzverhalten. Die Ergebnisse eines Konvergenznachweises ausgewählter Versuchsdurchläufe bei der Kopplung von PSO und NC-Parser-Applikation sind in Anhang A1.2 gezeigt. Für die Konfidenzanalyse der Ergebnisse der ersten Phase sei ebenfalls auf Anhang A1.3 verwiesen.

6.2.1 Ansteuerung der virtuellen Werkzeugmaschine und Datenhaltung für die Werkstückpositionierung

6.2.1.1 Nutzung und Bedienung eines virtuellen Werkzeugmaschinenmodells

Mithilfe der vWZM wird die Kollisionsprüfung als Bestandteil der zweiten Phase des Aufspannverfahrens I (vgl. Kapitel 5.1) realisiert. Zum Verständnis im Umgang mit diesem Simulationswerkzeug werden die Bedienung und Einrichtung der vWZM als Testumgebung unter konventioneller Nutzung vorgestellt.

Arbeitsbereich und manuelle Einrichtung der virtuellen Werkzeugmaschine

Der erste Schritt nach dem Programmstart der vWZM (*DMG Virtual Machine*) ist die Auswahl des gewünschten spanenden Arbeitsbereichs, der eine 1:1-Abbildung einer realen spanenden Werkzeugmaschine darstellt. Die Maske beinhaltet Einstellungsmöglichkeiten wie z. B. das Ausblenden bestimmter Maschinenteile (z. B. Gehäuse- und Gestellteile), um somit eine verbesserte Sicht auf den Arbeitsbereich und die Fertigungsprozesse zu erhalten. Die Abbildung 37 illustriert dazu die Maske (vgl. rote Markierung) und Maschinendarstellung, wie sie im Einrichtungsmodus sichtbar ist.

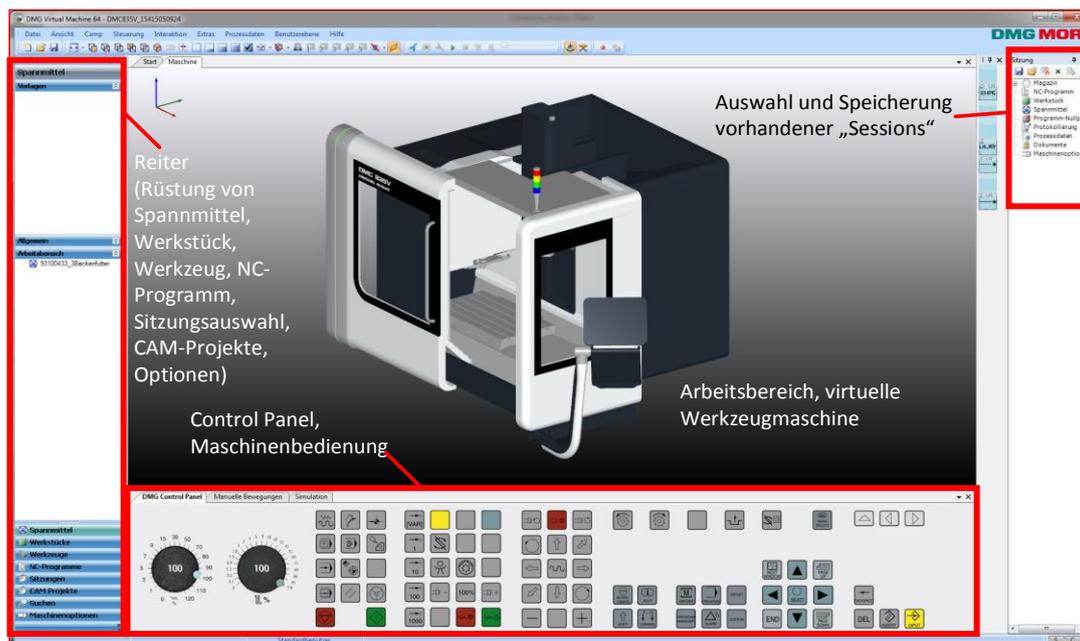


Abbildung 37: Schnittstelle zur Bedienung der vWZM (vgl. [DVM16-ol])

Auf der linken Bildschirmseite der Abbildung 37 befinden sich Reiter, die das Einrichten der Maschine mithilfe einer *Drag-and-Drop-Funktion* ermöglichen. Die Reiter unterteilen sich in *Spannmittel*, *Werkstücke*, *Werkzeuge* und *NC-Programme*, *Sitzungen* und *CAM-Projekte*. Gespeicherte Werkzeuge und Spannmittel werden hier angezeigt. Die Elemente zur Einrichtung einer Fertigungssimulation sind über weitere Funktionen konfigurierbar. Daneben können neue Elemente angelegt werden. Um die Maschine mit Werkzeugen auszurüsten, können die Werkzeugdateien unter dem Reiter *Werkzeuge* durch das Eingabegerät (Mauszeiger) in das Werkzeugmagazin „eingefügt“ werden. Eine Visualisierung wird ebenfalls ermöglicht. Die Werkzeugpositionierung über die *Drag-and-Drop-Funktion* erfolgt in unmittelbarer Nachbarschaft, sodass ein Auslassen von Werkzeugplätzen im Magazin nicht erfolgen kann.¹⁸⁵ Ebenso kann das Spannmittel in dem Arbeitsraum mithilfe des Eingabegeräts (z. B. Mauszeiger) angeordnet und das Werkstück auf dem Spannmittel positioniert werden. Die Verschiebung und Positionsänderung des Spannmittels und des Werkstücks sind manuell einstellbar. Dazu kann, ausgehend vom Nullpunkt der Maschine und der Simulation, die Verschiebung der Bauteile mit zugehörigen Spannmitteln in der jeweiligen Koordinatenrichtung des kartesischen Koordinatensystems unter diskreten Millimeterangaben eingestellt werden. Die erstellten NC-Programme können ebenfalls entsprechend geladen werden. Am unteren Bildschirmrand befindet sich eine 1:1-Umsetzung des *Steuerungs-Panels (Control Panel)* der jeweiligen Maschine, mit der eine realgetreue Steuerung der Werkzeugmaschine möglich ist.

¹⁸⁵ Die Werkzeugplätze im Magazin werden immer nacheinander folgend belegt. Eine direkte Platzbestimmung ist so nicht möglich, sondern erfordert einen Eingriff in die *Session-Datei*, vorliegend als VMDE-Format. Dieses Vorgehen ist komplex und für Bediener mit geringen Erfahrungen im Umgang mit der Simulation nicht zu empfehlen, ohne die Spezifikation des Datenformats zu kennen.

Nach Bestückung der Maschine mit Werkzeugen, Spannmitteln, Werkstücken und NC-Programm kann die Simulation durchgeführt werden.

Die bereits eingerichtete Werkzeugmaschine mit zugehörigem Spannmittel, Bauteil, Werkzeug und NC-Programm kann als sog. *Session* abgespeichert werden. Die gespeicherte *Session-Datei* wird in einem maschinenlesbaren Dateiformat abgelegt, der sog. VMDE. Dieses Format dient auch für die Werkstück- und Werkzeugpositionierung als Schnittstelle.

Schnittstelle zur Maschineneinrichtung der virtuellen Werkzeugmaschine

Durch die Struktur und des logischen Aufbaus der zur Einrichtung der vWZM notwendigen VMDE-Datei wird eine standardisierte Maschinenlesbarkeit gewährleistet. Mithilfe dieser Datei können Umspannvorgänge und Kompletttrüstvorgänge in der Simulationslandschaft definiert und konfiguriert werden. Das Umspannen kann durch manuelle Änderungen der Simulationssession mithilfe der Bedieneroberfläche durchgeführt werden. Eine Aktualisierung überspeichert die vorherigen Angaben in der VMDE-Datei. Durch die Datenstruktur der VMDE kann eine Simulationssession auch rechnergestützt über dritte Fremdapplikationen verarbeitet werden, was für die Einrichtung einer verbesserten Werkstück- und Werkzeugposition vorteilhaft ist. Die logische Grundstruktur wird anhand der Abbildung 38 verdeutlicht. Für eine valide Verarbeitung muss diese Struktur zwingend eingehalten werden. Die angeführte Struktur weist hier die Mindestangaben aus, die für die Einrichtung einer virtuellen Werkzeugmaschine erforderlich sind. (vgl. [Wei11])

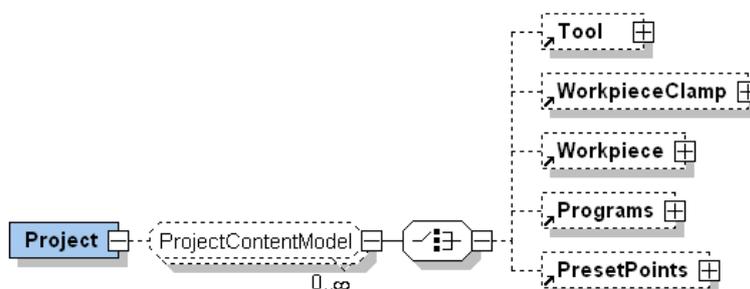


Abbildung 38: Grundstruktur der VMDE zur Einrichtung der vWZM (vgl.[Wei11], [DVM16-ol])

Die Struktur aus der Abbildung 38 ist in Abbildung 39 als XML-basierendes Format aufgezeigt:

```
<VMDE>
  <Head />
  <Project>
    <Tool id="T1000" />
    <WorkpieceClamp id="WC1000" />
    <Workpiece id="W1000" />
    <Programs />
    <PresetPoints />
  </Project>
</VMDE>
```

Abbildung 39: Schematischer Aufbau der VMDE-Struktur (vgl. [Wei11], [DVM16-ol])

Unter den Angaben *WorkpieceClamp* (Spannmittel) und *Workpiece* (Werkstück) sind Attribute wie z. B. „*id*“ (ID), „*name*“ (Name), „*technology*“ (Funktion/Technologie), „*ZeroPoint*“ (Nullpunkt) und „*location*“ (Position auf dem Maschinentisch bzw. Koordinaten des Programmnullpunkts, bezogen auf den Werkstücknullpunkt) erfasst. Die Angaben sind als „*Tags*“ in Winkelklammern (Zeichen <>) aufgeführt. Ein geöffneter „*Tag*“ ist mit „<“, der geschlossene „*Tag*“ ist mit „/>“ definiert. In diesen „*Tags*“ sind die kartesischen Koordinaten für die Translation der *x*-, *y*-, *z*-Richtung sowie die Orientierung θ (in der Regel um die *z*-Achse) angegeben. Der „*Tag*“ für die Position hat dabei die beispielhafte Beschreibung `<Reference translation="0 -15 0"/>`, wodurch das Werkstück in Referenz des Nullpunktkoordinatensystems um 15 Einheiten (Millimeter) in die negative Zählrichtung der *y*-Achsenrichtung verschoben ist. Diese Form der Positionierung gilt äquivalent für die Spannmittel (*WorkpieceClamp*). Um die Umspannung zu erzeugen, kann der Koordinatenwert in den entsprechenden „*Tags*“ nach Planungsvorgaben verändert werden. Um die aufgespannten Werkstücke und Spannmittel auf den virtuellen Maschinentisch ablegen zu können, werden die Koordinaten als sog. „*positionframe*“ deklariert, der dem jeweiligen Gegenstück, dem „*dockingframe*“, zugeordnet ist („*positionframes*“ verweisen auf „*dockingframes*“). Das bedeutet, dass für die Änderung der Position eines Bauteils die jeweilige Positionskoordinate am „*positionframe*“ des Werkstücks oder am Spannmittel geändert wird. Soll das Werkstück z. B. auf dem Spannmittel aufliegen und die „*positionframe*“-Koordinate des Spannmittels, die dem „*dockingframe*“ des Maschinentisches zugeordnet ist, verändert werden, würde die Werkstückverschiebung ebenfalls erfolgen, da „*dockingframe*“ und „*positionframe*“ zwischen Spannmittel und Werkstück sich gleichermaßen verändern (Vererbung). Koordinaten am Werkstück müssen also nicht zwangsläufig separat angepasst werden. Die entstandene „*Vater-Sohn-Beziehung*“ gleicht einer Hierarchie, durch die die Position des Werkstücks im gleichen Verhältnis verändert wird (Vektoraddition).

Manipulation der Werkstückpositionskoordinaten

Die Koordinaten der Positionen in den „Tags“ des VMDE-Datenformats sind essenziell für die Automatisierung der Werkstückposition, da diese Koordinaten automatisch ausgelesen (extrahiert) und nach eindeutiger Zuordnung zum Fertigungsauftrag in eine SQL-Datenbank abgelegt werden. Die Werkzeuge und das NC-Programm werden äquivalent ausgelesen und decodiert, sodass Modifikationen möglich sind. Die Abbildung 40 illustriert die Auswirkung durch eine automatisierte Veränderung der Aufspannlage in positiver Zählrichtung der x -Achse um 410 mm, ausgehend von dem Koordinatenursprung. Der Extrahierprozess erfolgt durch eine Softwareapplikation, z. B. mithilfe der Programmiersprache Java und der Nutzung von *regulären Ausdrücken (Regex)*.

Ausgangslage des Spannmittels mit den Koordinaten $x = 0$; $y = 0$; $z = 0$:

```
<WorkpieceClamp name="931004
  <Image contentType="image/
  <ClampGeometry>
  <Transform>
  <Group>
```

Vershobenes Spannmittel in Richtung der x -Achsen, Koordinaten: $x = 410$; $y = 0$; $z = 0$:

```
<WorkpieceClamp name="93100433_3Backer
  <Image contentType="image/bmp">Qk3ei
  <ClampGeometry>
  <Transform translation="410 0 0">
  <Group>
```

Abbildung 40: Prinzip der Veränderung der Koordinaten der Werkstückposition

Die beispielhafte Werkstückpositionsänderung aus Abbildung 40 wird als manuelle Änderung in der Simulationsumgebung durch den Nutzereingriff in Abbildung 41 demonstriert.

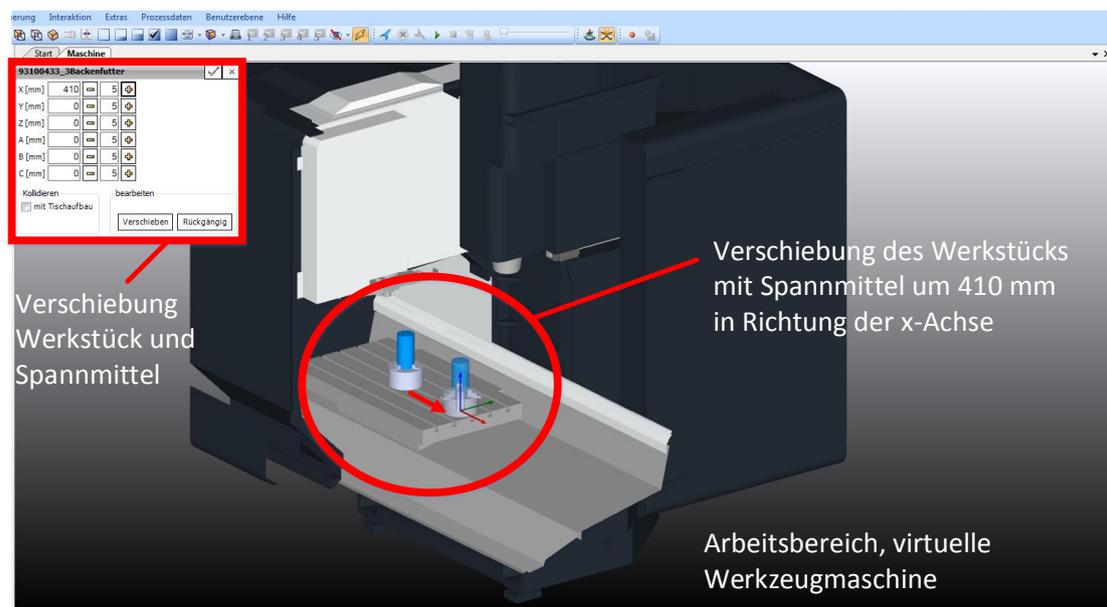


Abbildung 41: Manuelle Positionsveränderung von Werkstück und Spannmittel in der Simulation (vgl. [DVM16-ol])

Bei der Umsetzung der Werkstückpositionierung (vgl. Kapitel 5.1.2) als 2-phasiger-Ansatz (Aufspannverfahren I und II) werden die Koordinaten nach jedem Optimierungsvorgang in eine Datenhaltung überführt und die vWMZ durch eine externe Maschinenansteuerung und einen *Simulation Scheduler*¹⁸⁶ gestartet. Die notwendigen *Session-Daten* der jeweiligen Simulation (Validierung von Auftrag und Werkstückposition), d. h. alle notwendigen Rüstinformationen, werden automatisch aus der Datenbank zusammengesetzt. Genauere Ausführungen zu dem Ablauf der Ansteuerung und der Datenschnittstelle der Aufspannposition der Werkstücke werden in Kapitel 6.2.1.2 erläutert. Die Werkzeugbelegung in dem Werkzeugmagazin erfolgt nach einem identischen Prinzip mithilfe des Schnittstellenformats und einer Datenhaltung.

6.2.1.2 Datenhaltung für die Werkstückpositionierung

Die Datenhaltung für das Aufspannverfahren I enthält nicht nur die aufspannspezifischen Daten, sondern auch weitere auftrags- und fertigungsbezogene Daten, die nicht unmittelbar mit der Werkzeug- und Werkstückpositionierung zusammenhängen. Einen Ausschnitt, der die Umsetzung des Datenbankmodells für die Werkstückpositionierung zeigt, wird schematisch in Abbildung 42 dargestellt. Eine Erweiterung des Datenbankmodells für weitere auftragsbezogene Daten ist in Abhängigkeit von den Anforderungen einer Organisation zu gestalten. Allgemein dient die Datenbank hier als Schnittstelle zwischen Nutzer, Optimierung und Verteilung zu den vWZM-Instanzen. Eingetragene Fertigungsschritte und die damit verbundenen Aufspannkoordinaten werden automatisch aus der Datenbank extrahiert und durch die vWZM validiert. Dieses Vorgehen ist in der Praxis bislang **nur** unter manueller Bedienung und Datenpflege möglich. Bei dem Aufspannverfahren I greift die Optimierungskomponente über das *Polling*¹⁸⁷-Verfahren auf die Datenbank zu, um eine automatisierte Ansteuerung zu gewähren. Das „*Polling*“ wird durch einen Auftragseingang¹⁸⁸ in der Tabelle „*event*“ (vgl. Abbildung 42) ausgelöst (und damit wird auch das Aufspannverfahren gestartet). Dazu liegen die Event-Einträge „*valid = 1*“ und „*optimized = 0*“ vor. Der Zustand „*valid = 1*“ gibt allgemein an, ob ein Auftrag durch die vWZM geprüft wurde. Der Event-Eintrag „*optimized = 0*“ beinhaltet die Events, die durch das Aufspannverfahren I nicht bearbeitet wurden (vgl. Abbildung 43). Nach erfolgreicher Reduzierung der Zykluszeit und Generierung der Koordinaten wird der Parameter auf „*optimized = 1*“ gesetzt. In dem hier dargestellten Anwendungsfall werden keine peripheren Geräte angesteuert, sondern der Status eines Datenbankeintrags wird zyklisch synchron zur Auftragsverwaltung überwacht (Tabelle „*event*“), um die Optimierungs- und Validierungskomponenten automatisiert zu starten.

¹⁸⁶ Die Applikation *Simulation Scheduler* verteilt die Validierungsaufträge der Werkstückpositionierung auf die Simulationsinstanzen und wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *InVorMa* des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL* entwickelt.

¹⁸⁷ Unter *Polling* wird das zyklische softwaremäßige Abfragen der peripheren Geräte durch den Prozessor verstanden (vgl. [Güb10]).

¹⁸⁸ Der Auftragseingang erfordert eine Auftragseingabe über die Nutzerschnittstelle (vgl. Kapitel 6.1).

Das Aufspannverfahren I greift nach dem Programmstart auf die Tabelle „*production_step_has_workplace*“ zu, die in Abbildung 42 mit dem rot markierten Pfeil gekennzeichnet ist. Die Entitäten des Datenbankmodells und die zugeordneten Attribute werden in einer Übersicht in Anhang A1.6 aufgeführt. Die nicht erwähnten Entitäten außerhalb des hier vorgestellten Datenmodell-Ausschnitts enthalten auftragsbezogene Daten und sind für die Werkstück- sowie für die Werkzeugpositionierung irrelevant. Die Beziehungen der Entitäten sind ebenfalls in der Abbildung 42 angeführt und bestehen aus 1:1- oder 1:n-Beziehungen.

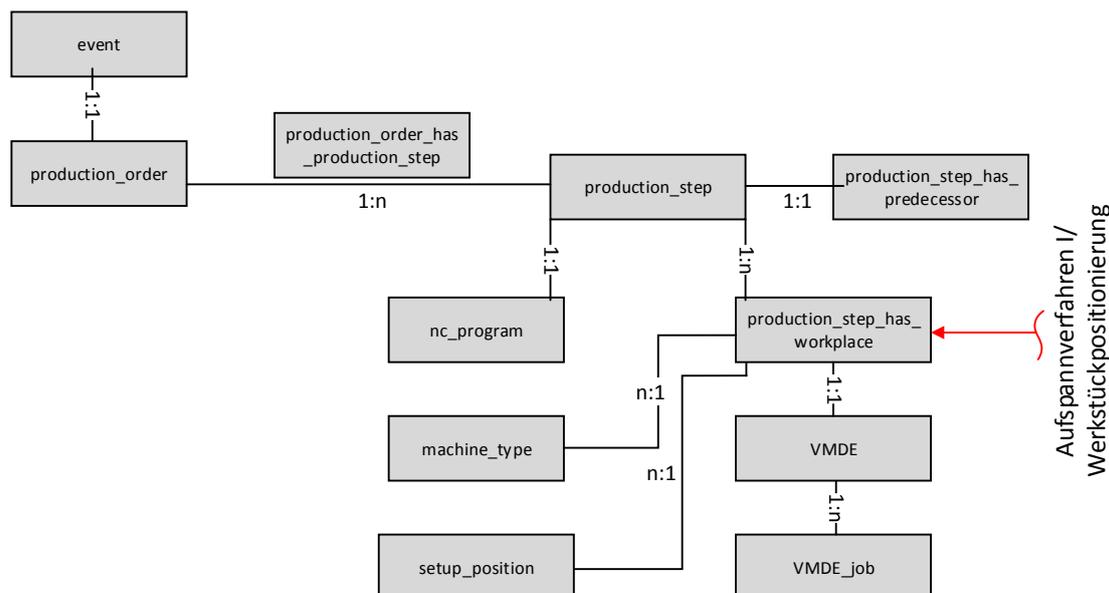


Abbildung 42: Datenbankmodell für das Aufspannverfahren I

Ferner wird im Rahmen der Überprüfung der Aufspannposition und -verbesserung auf die Entität „*production_step_has_workplace*“ verwiesen, um Zugriff auf die VMDE-Datei, den Maschinentyp und indirekt auf das NC-Programm zu erhalten. Die VMDE enthält mitunter die notwendigen Positionskoordinaten für die Aufspannlage (vgl. Kapitel 6.2.1.1). Da die VMDE-Daten umfangreich¹⁸⁹ sein können, werden sie zur Verarbeitung in Zeichenketten (*Substring*) mit geringerer Zeichenlänge unterteilt und je nach Bedarf automatisiert ausgelesen und zu individuellen VMDE-Sessions zusammengesetzt. Die verbleibenden Tabellen dienen der Zuordnung der Koordinaten aus der VMDE zu den jeweiligen Maschinen und Produktionsschritten.

Das *Scheduling-System* (vgl. Kapitel 5.1.2.1 und Anhang A1.1) verarbeitet die VMDE zu Aufträgen und weist diesen den vWZM-Instanzen zu. Die Verteilung findet nach erfolgter Identifikation zykluszeitreduzierter Werkstückpositionskoordinaten (zwei-phasiger Ansatz) statt. In der VMDE-Entität sind sog. *Substrings* [geschrieben als „*substring*“] zu finden, die Informationen über die gesamte Einrichtung der Maschine beinhalten. Diese

¹⁸⁹ Die Speicherplatzgröße einer VMDE variiert in Abhängigkeit der Bauteilkomplexität, da grafische Elemente ebenfalls hinterlegt sind. Von wenigen Megabyte kann diese mehrere Gigabytes umfassen.

Substrings können als inhaltliche Informationen für einen oder mehrere Aufträge zusammengestellt werden und für die Anwendung bzw. Validierung durch die Simulationslandschaft bereitgestellt werden. Nach der Validierung der Aufspannkoordinaten via Simulation werden die finalen Einrichtungs-Datenelemente zu einer endgültigen VMDE (*Session*) zusammengesetzt und dienen dem Nutzer als vollständig eingerichtetes Abbild der Fertigungssituation. Die Koordinaten werden daneben separat in der Datenbank hinterlegt.

Die Tabelle *Event* dient des Weiteren zur Anzeige neuer Vorkommnisse, die während der Fertigung auftreten, wie z. B. Maschinenausfälle oder neue Aufträge, die in das System eingepflegt wurden. Aufträge (*production_order*) beinhalten Fertigungsschritte (*production_steps*). Diese Fertigungsschritte haben eine Vorgänger-Nachfolger-Beziehung, was in der Datenbank über die Schnittstelle zu der Tabelle „*production_step_has_predecessor*“ verdeutlicht wird.

Zum Einlesen der Daten wird eine Java-Applikation verwendet, die die relevanten Daten automatisch ausliest (*parsing*). Exemplarisch ist die Tabelle „*production_step_has_workplace*“ in der Abbildung 43 angeführt, auf die das Aufspannverfahren I zugreift.

id	production_step_id	workplace_id	configuration	processing_time	setup_time	extra_work_time	valid	optimized	default_workplace
1	1	2	Standard	2100	1	NULL	1	0	0
2	2	2	Standard	1900	1	NULL	1	0	0
3	3	2		1800	1	NULL	0	0	0
4	4	1		1100	1	NULL	0	0	0

Abbildung 43: Datenbank-Entitäten in tabellarischer Form der Tabelle *production_step_has_workplace*

In der Abbildung 43 ist die Spalte „*optimized*“ mit der Ziffer „0“ eingetragen. Die Aufspannkoordinaten werden demnach aus der VMDE extrahiert, und das Aufspannverfahren I wird angesteuert.¹⁹⁰ Die Lösungskandidaten, deren Aufspannparameter zu den geringsten Zeiten führen, werden in einer Liste \mathcal{L} gespeichert. Bezüglich des enthaltenen Clustering-Verfahrens bleibt die nachfolgende Annahme bestehen:

Annahme¹⁹¹: *Die Lösungen, die einen geringen euklidischen Abstand zueinander haben, verhalten sich ähnlich.*

Diese ursprünglich aufgestellte Annahme wird durch die Einteilung der Lösungen in Cluster durch die Anwendung des K-Means-Cluster-Algorithmus realisiert. Nach dem Clustering-Verfahren wird die durch den NC-Parser ermittelte beste Lösung (Aufspannkoordinaten, die zur minimalen Zykluszeit führen) aus jedem Cluster über die Datenbank an den *Scheduler* übergeben bzw. indirekt an die vWZM. Sollte sich mindestens einer der

¹⁹⁰ Beinhaltet die Extraktion des NC-Programms sowie Vorevaluierung durch die NC-Parser-Applikation.

¹⁹¹ Siehe Kapitel 5.1.2.2.

ermittelten Punkte als echt valide (kollisionsfrei) herausstellen, dann werden alle Lösungspunkte, die eine schlechtere Zykluszeit (geschätzt durch NC-Parser-Applikation) vorweisen, verworfen. Alle invaliden Lösungen werden insgesamt verworfen¹⁹² (optional). Bei ausreichend Speicherkapazität können auch die invaliden Lösungen in die Datenbank gespeichert werden, sodass diese mit den Lösungen zukünftiger Verfahrensprozesse verglichen werden¹⁹³, um unnötige Verfahrenswiederholungen zu vermeiden. Bei Auffinden einer validen Lösung wird der Wert in der Datenbank in der Spalte „*optimized*“ auf „1“. Zeitgleich wird die Bedieneroberfläche für den Nutzer aktualisiert. Dieses Verfahren wird kontinuierlich wiederholt, bis alle Tabellenwerte der Spalte „*optimized*“ gleich „1“ sind (vgl. Abbildung 43).

Die durch die zwei Phasen des Aufspannverfahrens I identifizierten Koordinaten für die Werkstückpositionen werden für die Weiterverarbeitung, z. B. für das Zusammenstellen zukünftiger VMDE-Daten, in die Tabelle „*vmde_job*“ unter „*position*“ abgelegt (vgl. Abbildung 44). Eine weitere Speichermöglichkeit ist die Ablegung der Einzelkoordinaten in die Tabelle „*setup_position*“, die mit der Tabelle „*production_step_has_workplace*“ und auch mit dem Aufspannverfahren I verknüpft ist (vgl. Abbildung 45).

id	vmde_id	status <small>0=wartet; 1=in Bearbeitung; 2=fertig</small>	validity	machine_id	simulation_type <small>1=verifikation; 2=optimierung</small>	position	production_step_has_workplace_id
51	1	0	NULL	1	0	[368.013529690738;-189.89581640501137;92.259406962...	6
52	1	0	NULL	1	0	[66.99831834243673;-88.78986497933164;314.02087166...	6
53	1	0	NULL	1	0	[182.87335003530058;-128.85441989271163;249.368351...	6
54	1	0	NULL	1	0	[319.90513007561174;-39.73822668685261;251.7292627...	6
55	1	0	NULL	1	0	[227.2748013917347;-81.15731413622612;336.30236434...	6
56	1	0	NULL	1	0	[206.70003534672878;-124.27127239122532]	6
57	1	0	NULL	1	0	[319.66196427496465;-139.94711994790802]	6
58	1	0	NULL	1	0	[219.8337576708984;-0.9794330861627714]	6
59	1	0	NULL	1	0	[67.90699458393101;-79.48165891077679]	6

Abbildung 44: Positionsdaten aus der Tabelle „*vmde_jos*“

id	production_step_has_workplace_id	x_position	y_position	z_position	angle_position	status_collision	positionframe_id
1	15	173,39	50,87	0	-16	0	1
2	15	265,77	21,86	0	-335,03	1	2
3	15	214,78	-76,46	0	-74,29	0	3
4	15	207,94	14,93	0	173,96	0	4
5	15	233,32	9,97	0	-180,99	0	5
6	17	153,67	-34,89	0	73,83	0	6

Abbildung 45: Positionskoordinaten aus der Tabelle „*setup_position*“

¹⁹² Dennoch können auch alle Lösungselemente eines Clusters nach Bedarf vollständig evaluiert werden, um ggf. eine bessere Lösung nicht auszuschließen, was durch das Ignorieren der als invalides Cluster deklarierten Lösungen die Regel wäre, sollte davon ausgegangen werden, dass sich die unmittelbaren Nachbarpartikel äquivalent hinsichtlich ihrer Fitness verhalten.

¹⁹³ Das Speichern invalider Lösungen neben den validen ist zunächst zu empfehlen.

6.2.2 Identifikation der zykluszeitreduzierten Werkstückpositionierung bei realen NC Programmen

Als Fertigungsszenarien, die die realen NC-Programme mitbringen, dienen zwei Werkstücke, hier bezeichnet als *Werkstück A* und *Werkstück B*. Die Werkstücke liegen zur Erprobung des Aufspannverfahrens I als simulationsfähige 3D-Modelle¹⁹⁴ vor. Die nachfolgende Abbildung 46 zeigt die Modelle als Rohteil sowie die jeweilige Zielgeometrie bei erfolgreicher Simulation¹⁹⁵. Dabei unterscheidet sich die Komplexität der NC-Programme: Die Komplexität geht aus der Zielgeometrie, der NC-Programmlänge sowie der Verwendung von Zyklen und Bahnkurven, die zur Erreichung der Zielgeometrie notwendig sind, hervor. Zur Charakterisierung der NC-Programme und zum Verständnis der unterschiedlichen Komplexitätsniveaus dient die Tabelle 11.

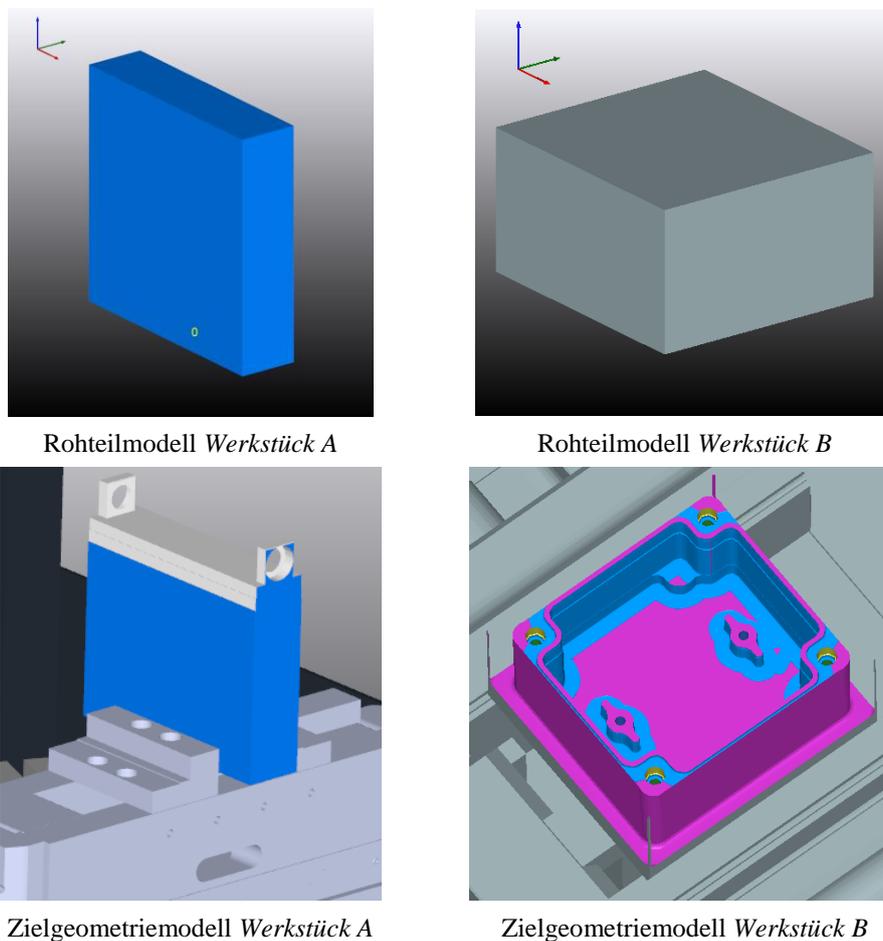


Abbildung 46: Demonstrationsmodelle der Werkstücke A und B als Rohteil und mit Zielgeometrie nach der Simulation

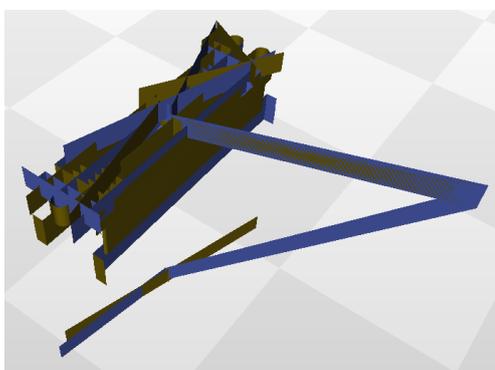
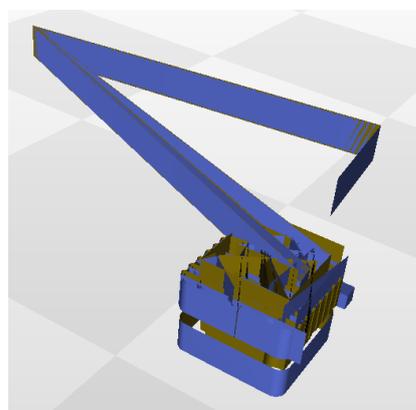
¹⁹⁴ Die Demomodelle wurden von der Firma *DMG MORI AG* für die Durchführung des Forschungsprojekts *InVorMa* des BMBF-Spitzenclusters *IT'S OWL*, bereitgestellt und dienen zur Erprobung und Validierung der entwickelten Ansätze der vorliegenden Dissertation.

¹⁹⁵ Erfolgreich ist die Simulation dann, wenn die Aufspannposition so gewählt wird, dass die korrekte Zielgeometrie erreicht ist und keine ungewollten Kollisionen stattfinden. Hier wurde die Initialaufspannung simuliert.

Tabelle 11: Eigenschaften der NC-Programme der Werkstücke A und B

Werkstück	Werkstückgröße (qualitativ)	Bohrungsvorgänge	Anzahl der Werkzeuge	Anzahl der Werkzeugwechsel
A	Gering	2 (Lochung gefräst)	1	1
B	Gering	6 (4 erfolgen durch zwei ungleiche Bohrwerkzeug-durchmesser)	7	7
Werkstück	Anzahl der NC-Sätze (inkl. Bahnkurveninterpolation)	Besondere NC-Zyklen	Anzahl NC-Sätze gesamt	
A	G0: 59 G1: 124 G2: 29 G3: 39	Cycle800 (Sinumerik 840D)	325 (bis Programmende M30)	
B	G0: 60 G1: 447 G2: 348 G3: 268	-	1812 (bis Programmende M30)	

Die Verfahrswege, die neben den Komponenten der Zykluszeiten durch die NC-Parser-Applikation abgeschätzt werden, lassen sich über eine *STL-Schnittstelle* visualisieren. Hierbei kann festgestellt werden, dass die Ausgabe der NC-Parser-Applikation als Basis für die notwendige Extraktion von Informationen valide ist und die Verfahrswege deckungsgleich mit denen der vWZM sind. Die Verfahrswege der NC-Programme für Werkstück A und B sind dazu in Abbildung 47 dargestellt.

Verfahrswege *Werkstück A*Verfahrswege *Werkstück B***Abbildung 47: Visualisierung der Verfahrswegeabschätzung durch die NC-Parser-Applikation für Werkstück A und B**

Start- und Initialkoordinaten der aufgespannten Werkstückpositionierung

In der Maschineneinrichtung (vWZM) ist die initiale Aufspannposition des Werkstücks mit den Koordinaten (0; 0; 0) angegeben, was den Koordinaten des „*positionframe*“, basierend auf der VMDE-Datei, entspricht. Am 3D-Modell befinden sich diese Koordinaten

zentral unterhalb des Spannmittels, auf dem das Werkstück aufliegt (xy -Ebene). Aus Perspektive des Maschinentisches liegt die „*dockingframe*“-Koordinate im Tischzentrum der xy -Ebene. Unter Berücksichtigung der Materialhöhe des Spannmittels ist die z -Koordinate mit 200 mm ¹⁹⁶ angegeben. Somit entspricht der Nullpunkt des Werkstücks nicht dem des „*positionframe*“ des Spannmittels, jedoch werden die Nullpunktdaten des Werkstücks bei entsprechender Änderungen des „*positionframe*“ automatisch angepasst. Hierbei ist zu beachten, dass die Bearbeitungspfade in Werkstückkoordinaten gemessen und die Aufspannpositionen aus Perspektive der Maschinenkoordinaten (und VMDE-Datei) gelesen und interpretiert werden. Das bedeutet insgesamt, dass die Variation der Aufspannlage mit der Koordinatenvariation, ausgehend von dem basierenden VMDE-Inhalt, erfolgt (vgl. Kapitel 6.2.1.1). In der NC-Parser-Umgebung wird in den Maschinenkoordinatenachsen der Wert $(0; 0; -200)$ ¹⁹⁷ mitgegeben.

Die zentrale Lage der „*dockingframe*“-Koordinate ist zu empfehlen, da damit gewährleistet werden kann, dass das Werkstück und die Spannmittel auch realitätsnah auf dem Tisch aufliegen und dem Nutzer kein *Schweben* von Komponenten suggeriert wird, was obsolet wäre. Der „*positionframe*“ ist in der dargestellten Anwendung nur für das Simulationsmodell selbst wichtig und wird für eine weitere Datenverarbeitung, speziell beim Transfer von Maschinenmodell zur realen Fertigung, nicht benötigt. Der effektive Werkzeugwechsellpunkt ist mit den Koordinaten $(-228,97; -0,5; -275,236)$ ¹⁹⁸ hinterlegt und wurde durch Anfahren der Maschine (NC-Parser-Applikation und Simulationsmodell) abgeschätzt. Die Koordinatenzählrichtung ist an das Maschinenkoordinatensystem sowie an das in der Steuerung und im Parser definierte Koordinatensystem orientiert, während die Aufspannparameter sich an das Koordinatensystem des „*dockingframe*“ (Werkstück) orientieren. Aus Sicht des Aufspannkoordinatensystems ist das Vorzeichen des Werkzeugwechsellpunkts umgekehrt zu betrachten bzw. sind die Aufspannkoordinaten mit umgekehrtem Vorzeichen in das Simulationsmodell einzupflegen. Für die Erprobung und Evaluierung der Szenarios ist die 5-Achs-Fräsmaschine *DMC80FD duoBLOCK*® der Firma *DMG MORI AG* als vWZM, wie in Abbildung 48 gezeigt, hinterlegt.

¹⁹⁶ Dabei ist die Koordinatenzählrichtung der jeweiligen Maschine bzw. NC-Parser zu berücksichtigen. Durch Achsenumkehr in der Applikation werden die Werte als Initialkoordinaten in z mit -200 angegeben.

¹⁹⁷ Die Spannmittelhöhe wird auf diese Weise vom NC-Parser als Initialgröße berücksichtigt. Es liegt keine harte Restriktion unterhalb des Parameters für z vor, sodass Lösungen durchaus mit dem Spannmittel kollidieren könnten. Dabei ist das Vorzeichen zu beachten.

¹⁹⁸ Die Werkzeugwechsellpunktcoordinate wurde durch manuelles Anfahren der virtuellen Werkzeugmaschine ermittelt und kann sehr geringen Schwankungen oder Abweichungen zur realen Maschine unterliegen, was jedoch zu vernachlässigen ist. Bei realer Anwendung müssen die Koordinaten überprüft und/oder aktualisiert werden. Der Werkzeugwechsellpunkt ist durch Maschinenhersteller fest vorgegeben, ebenso der Maschinennullpunkt. Es können also Koordinatenumrechnungsoperationen notwendig werden, sollten die Koordinaten abweichen. In Werkstückperspektive würden sich dann die Werkzeugwechselcoordinate $(228,970; 0,500; 275,236)$ ergeben.

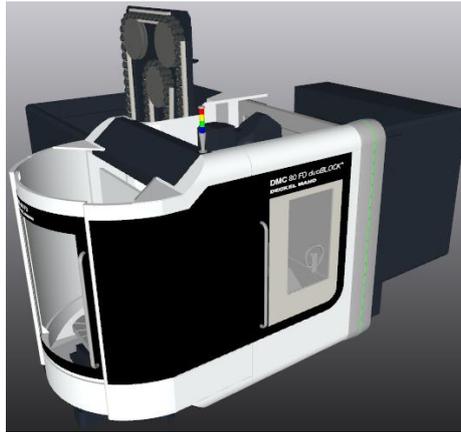


Abbildung 48: Fräsmaschinenmodell *DMC80FD duoBLOCK®* (vgl. [DVM16-ol], [DMU16-ol])

Notwendige Regeln zur NC-Programmanpassung bei variierenden Aufspannkoordinaten¹⁹⁹

Die Aufspannkoordinaten, die sich auf die translatorische Verschiebung des Werkstücks und des Spannmittels in die x -, y - oder z -Achsenrichtung beziehen, bringen eine Verschiebung des Werkstücknullpunkts im äquivalenten Verhältnis mit sich, sodass keine weitere Anpassung des NC-Programms erfolgen muss. Sollte jedoch eine Orientierungsänderung des Werkstücks um die z -Koordinate durch den Winkel θ stattfinden, wird der Nullpunkt übernommen, jedoch erfolgt keine Drehung des Koordinatensystems bezogen auf den Nullpunkt als solches, sodass die NC-Befehle (Zielkoordinaten) nicht autonom angepasst werden und die Zielgeometrie des Werkstücks nicht erreicht wird. Durch eine zusätzliche Applikation, die das NC-Programm einliest und an bestimmten Stellen die Zyklen verändert, kann diesem Effekt entgegengewirkt werden. Die zu verändernden Maßnahmen bzgl. der NC-Programme hängen von zwei wesentlichen Faktoren ab: 1. den zugrunde liegenden Steuerbefehlen der jeweiligen Hersteller der Steuerung; 2. der Auswahl und Gestaltung der NC-Befehle, ausgehend von der Programmierung über die CAD/CAM-Schnittstelle. Die Modifizierung der NC-Programme in allgemeiner Form ist auf NC-Programm-Ebene eines bestimmten Werkstücks identisch, jedoch sind unterschiedliche Regeln notwendig, die in Abhängigkeit vom Hersteller der NC-Steuerung erstellt werden müssen. Daraus folgt, dass keine allgemeingültige Applikation entwickelt werden kann, die die gesamte Menge aller bestehenden NC-Programme anpasst. Vielmehr wird sich einer Steuerungsart angenommen und es werden dafür individuell Regeln entwickelt. Bei einem Maschinenpark, der auch in der Simulationslandschaft vorliegen kann, sind z. B. deutliche Unterschiede bei den Regeln zwischen den Steuerungstypen von z. B. der *Siemens AG* oder *Heidenhain GmbH* identifizierbar, obwohl das Fertigungsteil bzw. der Auftrag identisch ist und damit das eigentliche Aufspannverfahren äquivalent angewendet werden kann.

¹⁹⁹ Bestandteile des Konzepts und dem Umgang mit bestimmten NC-Befehlen ist auch in dem Beitrag von *Weber et al.* (vgl. [WRS+16]) angedeutet.

Ein weiterer Faktor bei der Modifizierung der NC-Programme sind die NC-Programmstruktur und die Inhalte selbst: Dazu zählen die G-Befehle für die Nullpunktverschiebung, die Art der Zyklen für bestimmte geometrische Fräsoperationen und die Definition der Interpolationsregeln und -befehle. Je nach Komplexität kann ein solcher Modifikationsvorgang eines NC-Programms aufwendig sein. Für die Versuchswerkstücke A und B der vorliegenden Arbeit sind die Regeln hier aufgestellt, die eine Programmfunktionalität unter Berücksichtigung der Aufspannorientierung garantieren. Die Modifizierung erfolgt automatisiert durch Einlesen der jeweiligen Programme mithilfe von regulären Ausdrücken (*Regex*) und anschließender Modifizierung. Die für die Modifikation notwendigen NC-Befehle sind hierbei aus dem Steuerungshandbuch der jeweiligen Maschine entnehmbar, hier das Programmierhandbuch der Steuerung *Siemens Sinumerik 840D Grundlagen* (vgl. [Sin06]) sowie das Programmierhandbuch der Steuerung *Siemens Sinumerik 840D sl/828D Arbeitsvorbereitung* (vgl. [Sin13]). Nachfolgend erfolgt eine Beschreibung der notwendigen Maßnahmen, die in Form einer Softwareapplikation²⁰⁰ umgesetzt ist und bereits während der Auftragseingabe und des Starts der Identifizierung der Aufspankoordinaten beginnt.

Das NC-Programm für das Werkstück A beinhaltet Besonderheiten wie den G54-Befehl sowie den Zyklusbefehl CYCLE800, die für die Modifikation hinsichtlich der Orientierungsänderung des Werkstücks inklusive Spannmittel von Bedeutung sind. Der Befehl G54 verursacht im NC-Programm neben den Befehlen G55, G56 und G67 eine Nullpunktverschiebung. Das bedeutet, dass, ausgehend vom Basiskoordinatensystem, individuelle Werkstücknullpunkte eingerichtet werden können und diese Nullpunkte an verschiedenen notwendigen Programmstellen aufgerufen werden (vgl. [Sin06], [Sin13]). Weitere Nullpunkte sind z. B. durch die Befehle G505 bis G599 definierbar (vgl. [Sin06]). Um die Orientierung, bezogen auf den Nullpunkt, zu definieren, werden bzgl. dieser Steuerung für die NC-Programmierung sog. FRAME-Befehle verwendet. Für die programmierte Drehung stehen dazu die Befehle ROT oder AROT zur Verfügung. Diese Befehle müssen nach jeder Nullpunktverschiebung, wie z. B. G54, unter Angabe der Drehachse und des Drehwinkels eingefügt werden. Dadurch sind die nachfolgenden Zielkoordinaten, die sich auf die Nullpunktverschiebung beziehen, mit der neuen Orientierung durch das Werkzeug ansteuerbar. Dabei ist die mathematische Zählrichtung der Drehung zu beachten und die Winkelangabe in der Einheit Grad definiert. Nachfolgend sind das Verfahren und Auszüge aus den Programmen der Werkstücke A und B angeführt. Die Übersicht der Änderungen bzgl. der Befehle ROT und AROT sind für die Werkstücke in Tabelle 12 gezeigt. Für Werkstück B ist die Modifikation damit abgeschlossen, da es keine besonderen definierten Zyklen beinhaltet, die sich spezifisch auf die Programmiertechnik der Siemens-Steuerung beziehen und dabei auch für die Orientierungsänderung relevant wären. Die NC-Befehle sind bei Werkstück A in Fünferschritten durchnumme-

²⁰⁰ Dabei handelt es sich um eine weitere NC-Parser-Applikation, die das NC-Programm automatisch einliest, in die Datenbank des zugehörigen Auftrags ablegt und nach identifizierten Regeln bestimmte NC-Befehle hinzufügt, verändert, überschreibt oder löscht. Die Programmlogik bleibt unverändert.

riert, sodass der Befehl AROT mit $N[Nummer+1]$ eingefügt werden kann. Dies gilt äquivalent für das NC-Programm von Werkstück B mit dem Unterschied, dass hierbei die Schrittzahl der Befehlnummern in Zehnerschritten erfolgt. Sollte bei einem NC-Programm die Satz-Nummerierung von vornherein auf $n+1$ lauten, ist empfehlenswert, die Satz-Nummerierung in die Fünferschritt- oder Zehnerschritt-Nummerierung zu überführen, damit die Programmstruktur klar gegliedert und konsistent bleibt.

Tabelle 12: Übersicht über NC-Programm-Modifikationen für Werkstück A und B

Allgemeine Modifikation A	NC-Programm für Werkstück A	Allgemeine Modifikation B	NC-Programm für Werkstück B
...
N...	N30 G90	N...	N300 ...
N... G54	N35 G54	N... G54	N310 G54
N... AROT Z [θ]	N36 AROT Z30	N... AROT Z [θ]	N311 AROT Z [θ]
N...	N40 T...	N...	N320 T...
...

Der Zyklus-Befehl CYCLE800 ist ein Schwenkbefehl und beinhaltet in allgemeiner Form den nachfolgenden Aufbau mit den jeweiligen Angaben (vgl. [Sin13] S. 712ff.):

CYCLE800 FR[Freifahrmodus] TC[Name Schwenkdatensatz] ST[Status Transformation] MODE [Schwenkmodus] X0[Bezugspunkt X vor Drehung] Y0[Bezugspunkt Y vor Drehung] Z0[Bezugspunkt Z vor Drehung] X(A)[1. Drehung laut Angabe in MODE] Y(B)[2. Drehung laut Angabe in MODE] Z(C)[3. Drehung laut Angabe in MODE] X1[Bezugspunkt X nach Drehung] Y1[Bezugspunkt Y nach Drehung] Z1[Bezugspunkt Z nach Drehung] DIR[Verfahr Bewegung Rundachsen auslösen] FR[Freifahren in Werkzeugrichtung] DMODE[Display-Mode]

Für die Drehung um den Winkel θ werden die Werte X(A), Y(B) und Z(C) jeweils in der Einheit Grad [$^\circ$] und unter Berücksichtigung der mathematischen Zählrichtung angepasst. Konkret beinhaltet dies für den jeweiligen Drehbetrag die Addition oder Subtraktion des Winkelbetrages auf den bereits vorgegebenen Werten für X(A), Y(B) und Z(C). Ein weiterer Schritt ist die Anpassung der Basiskoordinaten X0, Y0 und Z0, die den Bezugsvektor $\vec{b} = (X0, Y0, Z0)^T$ abbilden. Der Vektor muss entsprechend mit der Drehmatrix $R^Z(\theta)$ multipliziert werden:

$$\vec{b}_{+1} = \vec{b} * R^Z(\theta) \quad (6.1)$$

Mit $R^Z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, wobei die Angaben für θ hier in RAD sind.

Zusammengefasst übernimmt die Applikation im Zuge der Orientierungsänderungen bzgl. der Aufspannlage die Aufgaben

- Einfügen von AROT/ROT[Achse; Grad] nach jeder G54-Nullpunktverschiebung,
- Anpassen von CYCLE800, sollte das NC-Programm ihn beinhalten,

für die hier verwendeten Testprogramme. Die Modifizierung der NC-Programme erhebt hierbei nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, jedoch ist sie für die im Rahmen der Arbeit erfolgten Testzwecke und Experimente ausreichend.

Aufspannkoordinaten für zykluszeitreduzierende Fertigung

Die aus dem Aufspannverfahren I generierten zykluszeitreduzierenden Koordinaten aus jeder vorliegenden Cluster-Menge werden jeweils an die virtuellen Werkzeugmaschinenmodelle verteilt und validiert. Als Testwerkstück wurde hierzu das Werkstück B verwendet. Bei Kollisionen oder sonstiger invalider Aufspannposition wird das zugrunde liegende Cluster verworfen und die zykluszeitreduzierende Position aus den angrenzenden Clustern gewählt.²⁰¹ Der Nutzer kann diesen Prozess aber auch unterbinden und direkt eine vollständig neue Berechnung der Aufspannkoordinaten ansteuern. Im Rahmen der Arbeit wurden Experimente mit 4, 6 und 8 Clustern durchgeführt, wobei sich die Koordinaten sowie das Verhalten der Identifikation der Aufspannkoordinaten unabhängig von der angegebenen Clusteranzahl ergeben. Die Clusteranzahl und die damit verbundenen Maschineninstanzen sorgen dafür, dass das Verfahren linear skaliert beschleunigt bzw. eine Verteilung von Validierungsläufen ermöglicht wird, sollten Instanzen²⁰² ausfallen. Sollten in einem Durchlauf alle Clusterwerte invalide sein, kann eine Erhöhung der Clusteranzahl infrage kommen, um die Anzahl der potenziellen Lösungen zu erhöhen.²⁰³

Um den Ansatz der Werkstückpositionierung umfangreich zu testen, wurden die Durchläufe in mehrere Dimensionen, Partikelgrößen und Generationen gegliedert. Hier wird zunächst die sinnvolle Werkstückverschiebung auf der Tischoberfläche in Achsenrichtung der x - und y -Achse (zwei Dimensionen) sowie zusätzlich durch die Orientierung θ um die z -Achse (drei Dimensionen) vorgenommen. Für jede Dimension- und Clusterkonfiguration (aus $k = \{4, 6, 8\}$) wurden für 20 Generationen und 50 Partikel pro Generation jeweils 10 Experimente durchgeführt. Diese Konfiguration (20 Generationen und 50 Partikel) ist die Standardeinstellung.

Weitere Experimente (jeweils 5 Versuche) erfolgen dann für das zweidimensionale (x, y) und dreidimensionale (x, y, θ) Aufspannverfahren mit 20 bzw. 30 und 50 Generationen sowie jeweils mit einer Partikelanzahl von 50 und 100. Die dreidimensionalen Fälle, bei der die x -, y - und z -Achse variiert werden, sowie die vierdimensionalen Fälle (x, y, z und θ) werden weniger ausführlich diskutiert, da die Variation der z -Aufspannkoordinate ein Anpassen des Spannmittels²⁰⁴ erfordert.

²⁰¹ In der Regel führen die Lösungen aus den benachbarten Clustern zu einer reduzierten, jedoch nicht (zwingend) zu einer minimalen Zykluszeit.

²⁰² In dem Fall wäre eine Instanz eine vWZM (Simulation) auf einem Rechnerkern.

²⁰³ Eine höhere Lösungsanzahl für die Kollisionsprüfung bedeutet auch immer einen erhöhten Simulationsdurchsatz und damit auch eine erhöhte Validierungsdauer.

²⁰⁴ Der Ansatz bzgl. der veränderten Aufspannhöhe (z -Achse) kann aus akademischer Sicht für eine aufspannabhängige Spannmittelauswahl für Fräsprozesse weitergedacht werden, ist aber für Praxisfälle technisch schwer umsetzbar und würde ständige Umspannarbeiten erfordern.

Dazu wurde mittels *Werkstück A und B* zusätzlich analysiert, inwiefern eine reine Orientierungsänderung durch θ die Aufspannpositionsidentifikation verändern bzw. hinsichtlich einer angestrebten Zykluszeit verbessern kann. Auf Basis der initialen Aufspannlage, die als Maschinentischzentrum definiert ist $(0, 0, [\text{Tischoberfläche}]$ bzw. $(0; 0; 200)$ ²⁰⁵, und des identifizierten Werkzeugwechsellpunkts wurde eine Zykluszeit aus dem NC-Programm des Werkstücks B in Höhe von $t_{ZN} = 453,2$ s gemessen.

Zur Verdeutlichung der Lage der einzelnen Aufspannpunkte bezogen auf die Maschinentischoberfläche ist zu jeder Experimentierreihe ein Diagramm angegeben, das die Lage als repräsentative Draufsicht für die Koordinaten x und y wiedergibt. Dadurch wird ein Positionsvergleich zwischen der Aufspannkoordinaten, der ursprünglichen Initialaufspannkoordinate und dem Werkzeugwechsellpunkt ermöglicht.

²⁰⁵ Hierbei ist zu beachten, dass auf Basis der NC-Parser-Applikation eine umgekehrte Vorzeichenregel gilt und aus Werkstücksicht die Aufspannung $(0; 0; 0)$ gilt.

Tabelle 13: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	219,83	-0,98	450,59	valide
	2	272,12	-25,92	450,80	nicht valide
		93,00	86,67	451,73	valide
	3	223,41	-47,96	450,77	valide
	4	200,47	-38,16	450,73	valide
	5	252,49	-20,04	450,67	nicht valide
		287,74	57,79	451,02	nicht valide
		189,60	-132,68	451,74	valide
	6	208,46	-12,88	450,63	valide
	7	235,48	52,32	450,85	valide
8	224,75	-19,49	450,63	valide	
9	145,78	-13,06	450,96	valide	
10	173,66	27,32	450,80	valide	
6 Cluster	1	222,40	-42,17	450,74	valide
	2	234,19	83,23	451,27	valide
	3	199,52	-30,18	450,69	valide
	4	252,83	22,26	450,67	nicht valide
		229,83	-31,08	450,69	valide
	5	249,78	-1,30	450,65	nicht valide
		154,95	-72,39	450,88	valide
	6	208,46	-12,88	450,63	valide
	7	198,78	-22,93	450,69	valide
	8	190,57	-72,28	450,87	valide
9	123,08	-91,11	451,32	valide	
10	213,96	-3,89	450,59	valide	
8 Cluster	1	225,58	28,93	450,68	valide
	2	179,15	16,92	450,77	valide
	3	255,82	30,23	450,71	nicht valide
		246,85	-34,49	450,72	nicht valide
	4	180,47	23,67	450,77	valide
		228,38	-12,30	450,59	nicht valide
		247,99	-72,85	450,89	nicht valide
	5	211,09	-75,17	450,90	valide
		196,52	-81,23	450,97	valide
	6	254,89	15,72	450,69	nicht valide
147,25		62,85	451,05	valide	
7	244,15	11,29	450,60	valide	
8	212,28	20,30	450,63	valide	
9	124,05	23,66	451,24	valide	
10	198,43	27,51	450,69	valide	

Unter 4 Clustern (vgl. Tabelle 13) ist für die Versuchsreihe eine durchschnittliche t_{ZN} mit 450,94 s erreicht worden, was eine durchschnittliche Reduzierung im Vergleich zu $t_{ZN,initial}$ (mit 453,2 s) 2,26 s ausmacht.²⁰⁶ Dabei sind nur die validen Koordinaten berücksichtigt. Die geringste t_{ZN} , die zu einer validen Aufspannposition (Kollisionsfreiheit) führt, erfolgt im Versuch Nr. 1 mit 450,59 s, was bzgl. der Initialaufspannung eine Zeit-

²⁰⁶ Teilergebnisse der einzelnen Partikel und die erreichten Zeiten für jedes Cluster bei 4 Clustern insgesamt, 20 Generationen und 50 Partikel sind in [WeLa17], S. 753 – 755, veröffentlicht.

ersparnis von 2,61 s ausmacht. Die invaliden Clusterergebnisse ziehen bei jeder Versuchsreihe ein Nachfolgeexperiment (gilt auch für 6 bzw. 8 Cluster) nach sich, bei dem der nächstbessere Cluster überprüft wird.

Bei 6 Clustern (vgl. Tabelle 13) wurde ein durchschnittliches t_{NZ} von 450,84 s erreicht, was eine durchschnittliche Reduzierung von 2,36 s ausmacht. $t_{ZN,min}$ beträgt hier 450,59 s, was eine Reduzierung von 2,61 s ausmacht. In der Versuchsreihe mit 8 Clustern (vgl. Tabelle 13) beträgt die durchschnittliche t_{NZ} bei validen Positionen 450,83 s, was eine durchschnittliche Reduzierung von 2,37 s ausmacht. Die $t_{ZN,min}$ ist im Versuch Nr. 8 mit 450,60 s identifiziert und führt zu einer Reduzierung von 2,60 s. Insgesamt sind unabhängig von der Cluster-Konfiguration vergleichbare Zykluszeitreduzierungen identifizierbar. In den Versuchsreihen sind insgesamt 10 invalide Aufspannpositionen aufgetreten. Die invaliden Koordinaten sind durch nachfolgende Koordinaten aus dem betreffenden Cluster ersetzt worden, und es wurde bei jedem nachfolgenden Cluster weitere valide Aufspannpositionen identifiziert, die eine vergleichsweise geringere reduzierte t_{NZ} aufweisen – jedoch kein Minimum, wie es bei dem Aufspannverfahren I zu erwarten ist.

Die identifizierten Aufspannkoordinaten sind in dem Diagramm in Abbildung 49 als zweidimensionale Ansicht dargestellt. Das Diagramm repräsentiert die Maschinentischoberfläche als Draufsicht (xy -Ebene), bei der ebenfalls die Werkzeugwechselkoordinate und die initiale Aufspannkoordinate ersichtlich sind: Eine Tendenz der validen Aufspannkoordinaten in Richtung Werkzeugwechselkoordinate (ausgehend von der Initialaufspannung) ist erkennbar. Die invaliden Positionen befinden sich bei Übertragung auf das Simulationsmodell unterhalb des Spindelaufbaus nahe der Spindellagerung und markieren den Bereich, den die Spindel nicht erreichen kann, bzw. hier eine direkte Kollision zwischen Werkzeug und Spannmittel bzw. Werkstück auftreten würde. Hierbei scheint die x -Koordinatenrichtung ausschlaggebend zu sein, was durch die Werkzeugwechselbewegung der Arbeitsspindel erklärt werden kann. Eindeutige Grenzkordinaten x_{grenz} und y_{grenz} konnten nicht ermittelt werden.

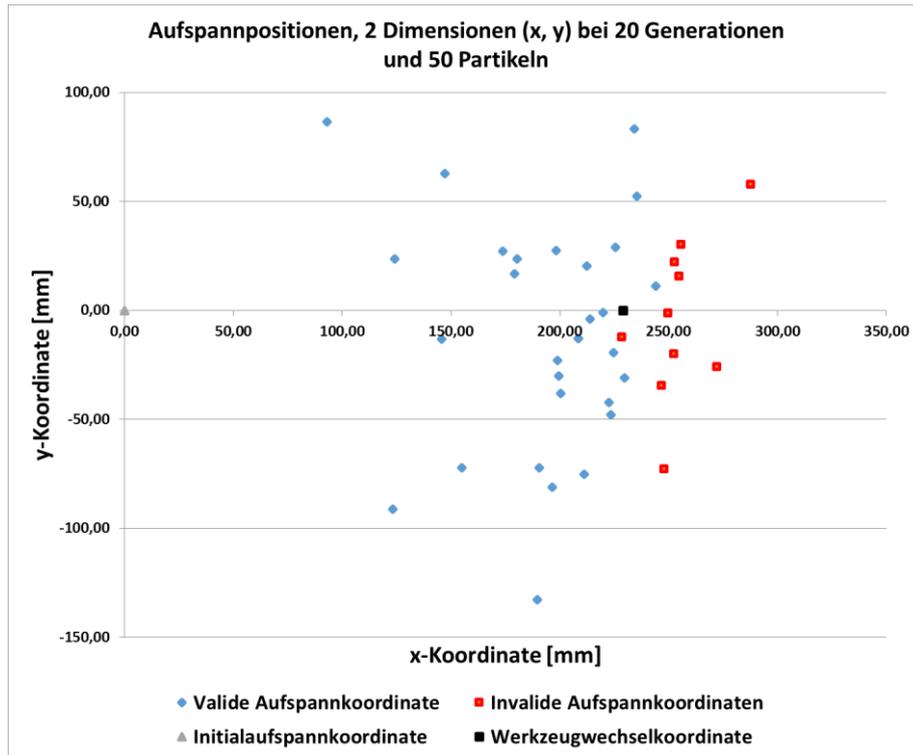


Abbildung 49: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 50 Partikeln

Unter 4 Clustern bei 3 Dimensionen (x, y, θ) (vgl. Tabelle 14) ist für die Versuchsreihe eine durchschnittliche t_{ZN} mit 450,73 s erreicht worden (nur valide Positionen), was eine durchschnittliche Reduzierung von 2,47 s ausmacht. Die geringste t_{ZN} , die zu einer validen Aufspannposition führt, geht aus Versuch Nr. 4 mit 450,59 s hervor, was bzgl. der Initialaufspannung eine Reduzierung von 2,61 s als Zeitersparnis ausmacht. Der zugehörige Aufspannorientierungswinkel beträgt für Versuch Nr. 4 $\theta = -180,99^\circ$. Insgesamt wurde nur eine invalide Aufspannposition identifiziert (Versuch Nr. 2).

Bei 6 Clustern (vgl. Tabelle 14) wurde ein durchschnittliches t_{NZ} von 451,23 s erreicht, was eine durchschnittliche Reduzierung von 1,97 s ausmacht. $t_{ZN,min}$ beträgt hier 450,70 s, was eine Reduzierung von 2,50 s ausmacht ($\theta = -224,68^\circ$, Versuch Nr. 9). Bei 6 Clustern wurden vermehrt invalide Positionen identifiziert, was zu einer vermehrten Anzahl an Simulationsläufen führt – jedoch wurden keine durch Nachfolgeüberprüfungen validen Positionen identifiziert. Der schlechteste Fall trat bei 6 Clustern in Versuch Nr. 5 auf, bei dem die Koordinaten der 4. Cluster-Lösung erst valide sind.

Tabelle 14: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, θ); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch	
4 Cluster	1	173,39	50,87	-16,34	450,86	valide	
	2	265,77	21,86	-335,03	450,76	nicht valide	
		214,78	-76,46	-74,29	450,92	valide	
		207,94	14,93	173,96	450,63	valide	
	4	233,32	9,97	-180,99	450,59	valide	
	5	153,67	-34,89	73,83	450,88	valide	
	6	205,04	-4,81	-142,94	450,65	valide	
	7	200,16	24,41	-73,06	450,68	valide	
	8	174,01	51,13	58,99	450,85	valide	
	9	206,35	3,12	119,60	450,64	valide	
10	227,30	-2,28	153,52	450,59	valide		
6 Cluster	1	157,09	8,53	117,77	450,86	valide	
	2	305,82	75,05	-20,81	451,31	nicht valide	
		326,70	25,10	-83,25	451,59	nicht valide	
		40,44	-59,33	-180,58	452,55	valide	
	3	260,85	-94,57	256,92	451,14	nicht valide	
		130,33	-74,60	65,53	451,16	valide	
		226,51	-41,22	-74,68	450,74	valide	
	4	256,00	40,51	-234,66	450,78	nicht valide	
		288,79	-27,29	-238,88	450,98	nicht valide	
		284,44	-79,43	-37,68	451,04	nicht valide	
	5	133,49	62,97	-126,53	451,16	valide	
		169,95	143,24	-241,98	452,23	valide	
		256,58	40,96	353,10	450,78	nicht valide	
	6	166,03	-45,25	-18,36	450,83	valide	
		129,94	8,46	225,03	451,16	valide	
		196,51	21,68	-224,68	450,70	valide	
	7	260,85	-46,76	9,40	450,80	nicht valide	
		157,09	8,53	117,77	450,86	valide	
		8 Cluster	1	244,94	24,13	65,69	450,65	nicht valide
	2		281,60	130,70	-316,54	452,03	nicht valide
351,36			-139,25	151,88	452,05	nicht valide	
345,47			152,72	259,45	452,40	nicht valide	
40,91			47,98	221,72	452,55	valide	
3	247,13		-12,85	-3,23	450,62	nicht valide	
	192,19		-36,76	180,57	450,72	valide	
	230,66		13,94	-245,02	450,59	valide	
4	271,98		52,65	65,18	450,91	nicht valide	
	264,09		-71,13	182,88	450,91	nicht valide	
	257,20	-77,48	-101,50	450,95	nicht valide		
5	131,82	-65,72	344,36	451,13	valide		
	223,14	-43,35	-178,81	450,75	valide		
	249,57	3,68	19,45	450,64	valide		
6	240,40	34,16	-9,34	450,70	nicht valide		
	174,00	-53,26	208,15	450,79	valide		
	199,31	-10,47	69,94	450,70	valide		
7	362,80	-25,96	-82,68	450,68	nicht valide		
	298,22	11,08	119,92	452,17	nicht valide		
	130,56	-17,00	325,68	451,13	valide		

In der Versuchsreihe mit 8 Clustern (vgl. Tabelle 14) beträgt die durchschnittliche t_{NZ} bei validen Positionen 451,00 s, was eine mittlere Reduzierung von 2,20 s ausmacht. Die $t_{ZN,min}$ ist im Versuch Nr. 3 mit 450,59 s identifiziert und führt zu einer Reduzierung von 2,61 s bei $\theta = -245,02^\circ$. Auch bei 8 Clustern traten vermehrt invalide Positionen auf. In

Versuch Nr. 1 wurden bspw. 5 Koordinaten überprüft, bis eine valide Position identifiziert wurde ($t_{ZN} = 452,55$ s, $\theta = 221,72^\circ$), wobei die Reduzierung mit 0,65 s gering ausfällt.

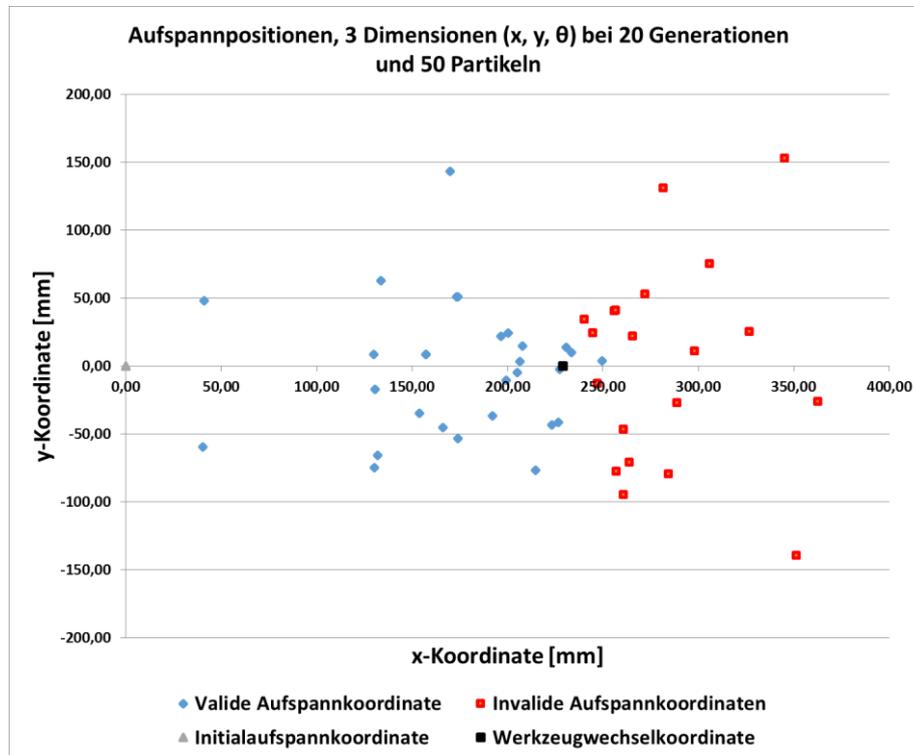


Abbildung 50: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 50 Partikeln

Die identifizierten Aufspannkoordinaten sind in dem Diagramm in Abbildung 50 als zweidimensionale Ansicht dargestellt. θ macht hier nur die Orientierung aus und wird bei der Punktdarstellung aus Gründen der Veranschaulichung vernachlässigt. Eine Tendenz der validen Aufspannkoordinaten in Richtung Werkzeugwechselkoordinate (ausgehend von der Initialaufspannung nach rechts) ist ebenfalls deutlich erkennbar. Die invaliden Positionen befinden sich rechts von der Werkzeugwechselkoordinate gelegen. Jedoch kommt es im Vergleich zur Abbildung 49 vor, dass ebenfalls valide Aufspannkoordinaten rechts von der Werkzeugwechselkoordinate liegen, was durch die Orientierungsvariation von Winkel θ erklärbar ist. Das heißt, durch die geschickte Generierung von θ wird eine mögliche Kollision vermieden, sodass hierdurch Positionen möglich sind, die bei translatorischer Koordinatenvariation möglicherweise invalide sind. Die Koordinate, die rechts vom Werkzeugwechsellpunkt angeordnet ist, ist z. B. dem Versuch Nr. 6 ($x = 249,57$ mm; $y = 3,68$ mm; $\theta = 19,49^\circ$) bei 8 Clustern zugehörig, und bei alleiniger Überprüfung von zwei Dimensionen x und y (ohne Variation von θ) führen diese Koordinaten zu einer invaliden Position. Der Winkel θ ist nachweislich entscheidend für eine verbesserte Werkstückposition. Hierbei scheint die x -Koordinatenrichtung ebenfalls in der Tendenz die hauptrichtungsweisende Aufspannrichtung (Dominanz) auszumachen. Eindeutige Grenzkordinaten x_{grenz} , y_{grenz} und θ_{grenz} konnten nicht ermittelt werden.

Tabelle 15: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 100 Partikeln

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 100 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x , betreffend X-Achse [mm]	y , betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	225,55	-3,60	450,65	valide
	2	192,83	-8,72	450,65	valide
	3	228,87	-1,91	450,65	valide
	4	200,67	-21,81	450,65	valide
	5	127,33	-12,71	450,97	valide
6 Cluster	1	163,94	-6,78	450,65	valide
	2	174,45	-31,53	450,65	valide
	3	171,08	-42,33	450,65	valide
	4	229,37	29,40	450,65	valide
	5	158,93	-4,07	450,65	valide
8 Cluster	1	239,27	25,33	450,65	valide
	2	173,92	19,66	450,65	valide
	3	252,36	16,11	450,67	nicht valide
	4	166,30	50,82	450,71	valide
	5	202,92	-5,62	450,65	valide
		241,91	58,46	450,75	nicht valide

Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse bei zwei Dimensionen (x, y), 20 Generationen und 100 Partikeln. Bei 4 und 6 Clustern wurden bis auf Versuch Nr. 5 bei den 4 Clustern identische Werte für t_{ZN} ermittelt, sodass hierzu mehrere Koordinaten zur freien Verfügung stehen. Für 4 Cluster beträgt der mittlere Wert für $t_{ZN} = 450,71$ s, was eine mittlere Reduzierung von 2,49 s ausmacht. Der minimale Wert $t_{ZN,min} = 450,65$ s gilt ebenfalls bei 6 Clustern, das zu einer Reduzierung von 2,55 s führt. Alle Koordinaten sind dabei valide. Bei 8 Clustern sind zwei invalide Lösungen identifiziert. Die mittlere valide Zykluszeit beträgt 450,66 s, was eine mittlere Reduzierung in Höhe von 2,54 s mit sich bringt. Die Koordinate für $t_{ZN,min} = 450,65$ s ist in Versuch Nr. 1, 2 und 4 identifiziert und führt zu einer Reduzierung in Höhe von 2,55 s. Die Verteilung auf die Maschinentischumgebung des Arbeitsraums ist in Abbildung 51 illustriert. Die Erhöhung der Schwarmgröße (Partikel) bringt hierbei nur eine marginale Verbesserung.

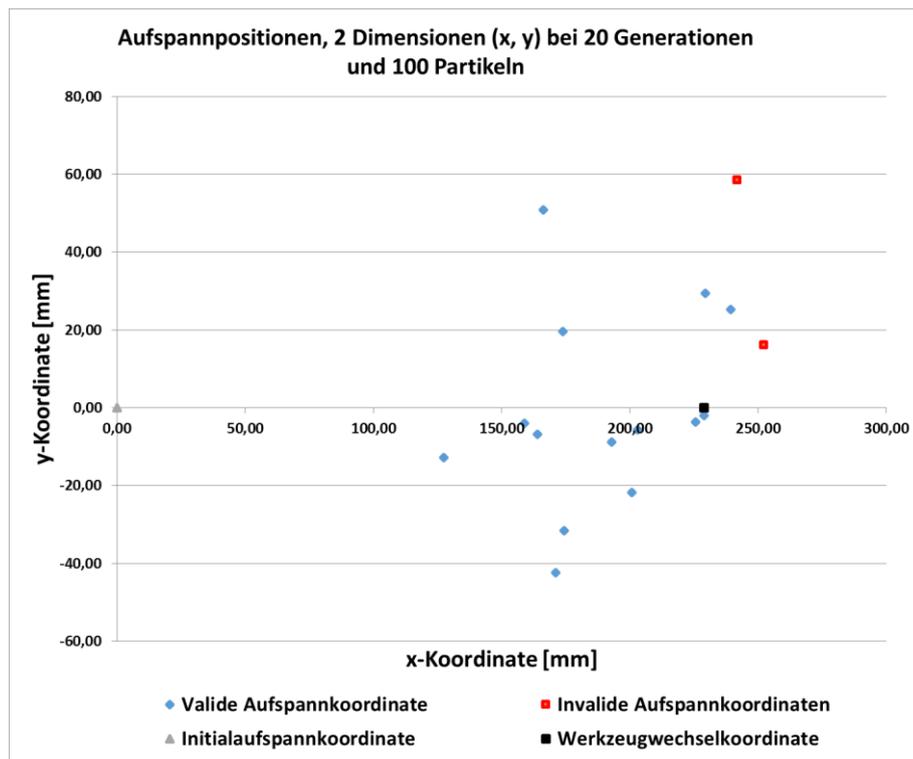


Abbildung 51: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 100 Partikeln

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse bei drei Dimensionen (x, y, θ), 20 Generationen und 100 Partikeln. Bei 4 Clustern beträgt die mittlere Zykluszeit $t_{ZN} = 450,91$ s, sodass die mittlere Reduzierung mit 2,29 s erreicht wird. Die Zeit $t_{ZN,min} = 450,70$ s führt zu einer Reduzierung in Höhe von 2,50 s. Versuch Nr. 6 (vgl. Tabelle 16) weist hier einen auffällig hohen Wert für die x -Koordinate auf ($x = 256,07$ mm), der bei anderen Versuchen, wie z. B. in Tabelle 14, Nr. 2 mit $x = 265,77$ mm oder in Tabelle 15, Versuch Nr. 3 mit $x = 252,36$ mm (hier 8 Cluster, zwei Dimensionen), invalide war. Daran kann die Konfiguration von y einen positiven Beitrag leisten sowie insbesondere die Kombination mit der Aufspannorientierung (hier $\theta = -206,3^\circ$).

Bei der Versuchsreihe mit 6 Clustern wurde nur bei Versuch Nr. 5 eine invalide Koordinatenzusammenstellung identifiziert. t_{ZN} beträgt im Mittel 450,72 s (die mittlere Reduzierung beträgt 2,48 s) und erreicht $t_{ZN,min}$ im Versuch Nr. 4 mit 450,59 s (die Reduzierung beträgt 2,61 s) bei $\theta = 240,73^\circ$.

Bei 8 Clustern sind hierbei zwei invalide Lösungen identifiziert. Die mittlere valide Zykluszeit beträgt 450,76 s, was eine mittlere Reduzierung in Höhe von 2,48 s mit sich bringt. Die Koordinate für $t_{ZN,min} = 450,65$ s ist in Versuch Nr. 3 identifiziert und führt zu einer Reduzierung in Höhe von 2,61 s. Die Verteilung der Lage der identifizierten Koordinaten der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Clustern sind im Diagramm in der Abbildung 52 vorzufinden. Die Orientierung wird hierbei nicht veranschaulicht, kann jedoch aus der zugehörigen Tabelle 16 entnommen werden.

Tabelle 16: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 100 Partikeln

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, θ); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 100 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, tZN [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	195,91	-3,10	29,04	450,70	valide
	2	196,53	-36,21	293,24	450,72	valide
	3	240,04	27,49	73,73	450,67	nicht valide
		221,60	-45,36	5,54	450,76	valide
	4	195,36	30,21	349,70	450,70	valide
	5	90,68	-82,39	-319,09	451,75	valide
	6	256,07	-75,23	-206,03	450,92	valide
	7	249,04	-27,53	-95,75	450,69	nicht valide
230,92		-52,00	-175,60	450,78	valide	
6 Cluster	1	215,60	17,60	33,09	450,61	valide
	2	184,74	-45,51	29,14	450,76	valide
	3	171,87	42,80	-258,05	450,83	valide
	4	227,59	6,38	240,73	450,59	valide
	5	243,28	-39,62	117,54	450,73	nicht valide
		170,56	-9,79	302,32	450,81	valide
8 Cluster	1	193,24	-37,55	189,02	450,72	valide
	2	198,14	36,03	293,19	450,72	valide
	3	238,91	-3,35	65,25	450,59	valide
	4	261,44	-11,68	-178,85	450,73	nicht valide
		267,23	-30,87	202,16	450,77	nicht valide
	5	132,09	-50,93	-260,85	451,13	valide
207,61		-21,75	-133,55	450,64	valide	

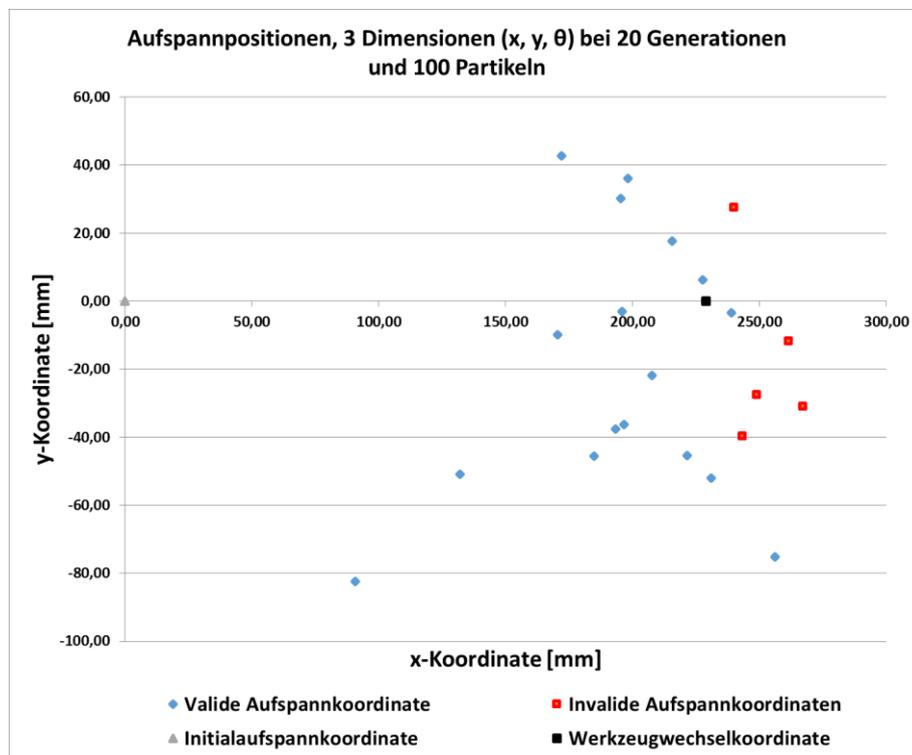


Abbildung 52: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 20 Generationen und 100 Partikeln

Tabelle 17: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 30 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	207,68	28,54	450,65	valide
	2	229,12	14,01	450,65	valide
	3	178,26	-65,72	450,65	valide
	4	333,95	62,55	451,48	nicht valide
		214,42	127,04	451,75	valide
	5	283,78	-96,61	450,99	nicht valide
		314,62	-54,84	451,17	nicht valide
		162,95	-138,09	451,60	valide
6 Cluster	1	180,31	4,13	450,65	valide
	2	167,05	34,37	450,65	valide
	3	195,94	-16,78	450,65	valide
	4	242,72	-27,56	450,65	valide
	5	206,10	28,39	450,65	valide
8 Cluster	1	159,95	-9,93	450,65	valide
	2	236,22	46,74	450,69	valide
	3	159,30	-13,30	450,65	valide
	4	176,02	13,59	450,65	valide
	5	175,62	26,25	450,65	valide

Die Versuche (2 Dimensionen, vgl. Tabelle 17) mit 30 Generationen als Stoppkriterium für die Phase 1 des Aufspannverfahrens I (vgl. Kapitel 5.1.2.1) sowie mit der Schwarmgröße von 50 Partikeln zeigen, dass in der Versuchsreihe mit 4 Clustern invalide Positionen und für 6 und 8 Cluster nur valide Koordinaten identifiziert wurden. Bei 4 Clustern beträgt die mittlere Zykluszeit 451,06 s, was eine mittlere Reduzierung von 2,14 s ausmacht. $t_{ZN,min}$ ist mit 450,65 s in Versuch Nr. 1 identifiziert und führt zu einer Reduzierung von 2,55 s. Die Konfiguration mit 6 Clustern erbringt bei jedem Versuch $t_{ZN} = 450,65$ s, was eine Reduzierung in Höhe von 2,55 s mit sich bringt. Bei 8 Clustern beträgt die mittlere Zykluszeit 450,66 s, die mittlere Reduzierung beträgt 2,54 s. $t_{ZN,min}$ wird in Versuch Nr. 1 mit 450,65 s identifiziert (Reduzierung 2,55 s).

Die Koordinatenpositionen sind in der Übersicht im Diagramm in Abbildung 53 aufgeführt. Die validen Positionen sind vermehrt in der Nachbarschaft des Werkzeugwechsellpunkts angeordnet, die invaliden Positionen zeigen eine vergleichsweise höhere Distanz zum Werkzeugwechsellpunkt. Hierbei sind auch valide Koordinaten identifiziert worden, die rechts vom Werkzeugwechsellpunkt liegen.

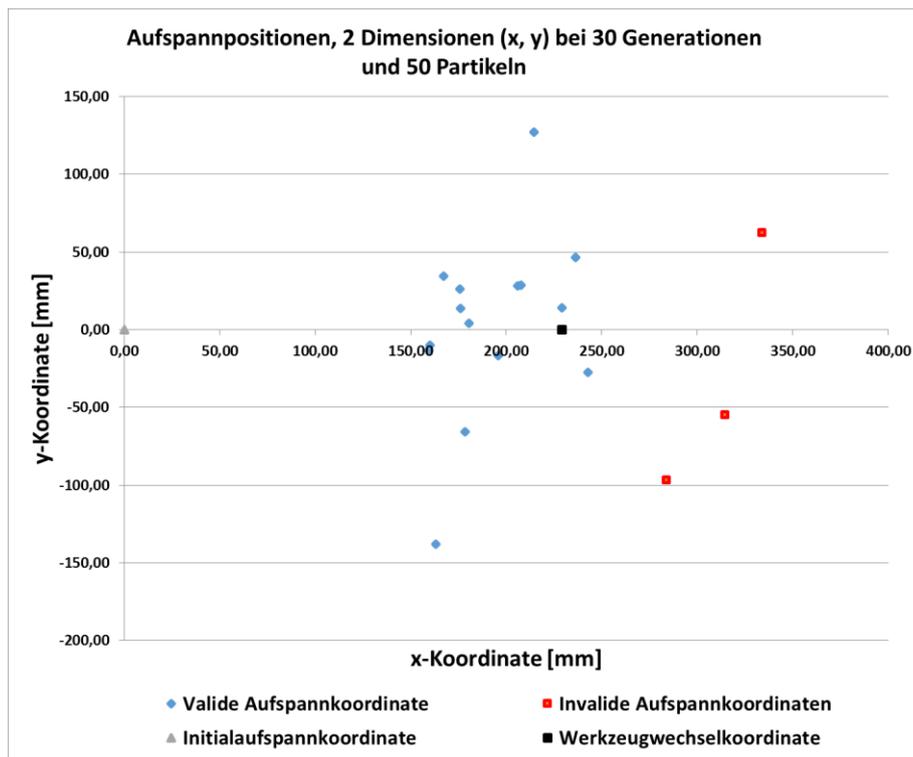


Abbildung 53: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 50 Partikeln

Tabelle 18 zeigt die Versuchskonstellation bei drei Dimensionen (x, y, θ), 30 Generationen und 50 Partikeln. Bei der Konfiguration mit 4 Clustern ist die mittlere $t_{NZ} = 450,76$ s, wodurch eine mittlere Reduzierung von 2,44 s erreicht wird. $t_{ZN,min}$ bei $\theta = 223,98^\circ$ ist mit 450,67 s identifiziert, wodurch eine Reduzierung von 2,53 s erreicht wird (Versuch Nr. 5). Bei 6 Clustern ist die mittlere Zykluszeit $t_{ZN,mittel} = 450,89$ s und die Reduzierung damit 2,31 s. Das Minimum aus der Versuchsreihe beträgt 450,61 s, was eine Reduzierung um 2,59 s ausmacht $\theta(t_{ZN,min}) = -315,54^\circ$. Bei 8 Clustern ergibt sich eine mittlere t_{ZN} von 450,74 s. Dadurch ist $\Delta t_{ZN,mittel} = 2,46$ s. Die minimale Zykluszeit ist bei Versuch Nr. 1 $t_{ZN,min} = 450,59$ s erreicht und bringt eine Reduzierung von 2,61 s mit sich, wobei $\theta(t_{ZN,min}) = -185,71^\circ$. Die Anzahl valider identifizierter Koordinaten überwiegt, jedoch sind hier im schlechtesten Fall jeweils zwei Simulationsdurchläufe und bei 6 Clustern drei Durchläufe notwendig, bis eine invalide Position eine valide Position nach sich zieht. Die Lage der Koordinaten für diese Aufspannpositionen ist in dem Diagramm in Abbildung 54 dargestellt.

Tabelle 18: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, θ); Abbruchkriterium: 30 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, tZN [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	330,18	-95,30	-67,00	451,64	nicht valide
	2	222,44	43,01	65,21	450,77	valide
	3	225,03	40,30	154,95	450,75	valide
	4	264,29	47,19	78,11	450,85	nicht valide
	5	158,74	19,70	-84,11	450,86	valide
	5	201,13	-22,99	223,98	450,67	valide
6 Cluster	1	184,05	45,01	-211,95	450,79	valide
	2	172,10	-72,68	-89,88	450,88	valide
	3	203,77	14,90	129,20	450,66	valide
	4	253,40	45,18	303,63	450,81	nicht valide
	5	251,55	73,07	-3,02	451,11	nicht valide
	5	139,49	99,70	-145,05	451,54	valide
	5	211,87	-16,37	-315,54	450,61	valide
8 Cluster	1	237,30	-10,51	-185,71	450,59	valide
	2	246,74	-19,94	-123,64	450,64	nicht valide
	3	175,44	-37,44	169,35	450,79	valide
	4	252,23	11,28	97,67	450,66	nicht valide
	5	182,02	-27,42	188,76	450,76	valide
	5	271,05	-41,86	-46,48	450,80	nicht valide
	5	204,74	50,60	-275,54	450,83	valide

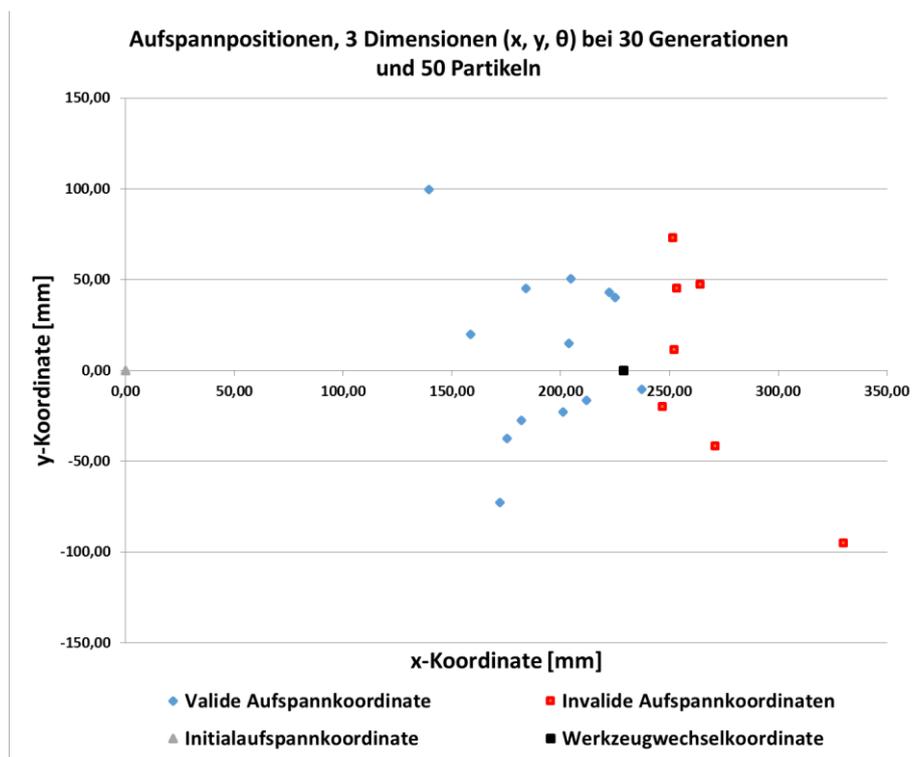


Abbildung 54: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 50 Partikeln

Die Ergebnisse in Tabelle 19 zeigen über alle Cluster valide Koordinaten bis auf Versuch Nr. 4 in der Reihe mit 8 Clustern. Die mittlere Zykluszeit bei 4 Clustern beträgt 450,65 s, was hier auch das Minimum ausmacht und wodurch die Reduzierung um 2,55 s determiniert wird.

Bei 6 Clustern gibt es eine Abweichung durch den Versuch Nr. 5, wodurch eine mittlere t_{NZ} von 450,67 s erreicht wird, und die mittlere Reduzierung 2,53 s beträgt. $t_{ZN,min}$ verhält sich aber identisch mit der Versuchsreihe zu der Konfiguration mit 4 Clustern.

Die Versuche mit 8 Clustern weisen eine mittlere Zykluszeit in Höhe von 450,69 s auf, was zu einer mittleren Reduzierung von 2,51 s führt. $t_{ZN,min}$ ist ebenfalls identisch zu den verbleibenden Versuchsreihen mit 4 respektive 6 Clustern. Die Lage der Positionen zeigt keine weiteren Besonderheiten auf und wird zur Übersicht in Abbildung 55 dargestellt.

Tabelle 19: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 100 Partikeln

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 30 Generationen; Schwarmgröße: 100 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	207,20	20,10	450,65	valide
	2	183,68	25,19	450,65	valide
	3	205,80	-5,65	450,65	valide
	4	216,84	-29,05	450,65	valide
	5	218,48	3,53	450,65	valide
6 Cluster	1	183,40	-21,45	450,65	valide
	2	232,34	-39,06	450,65	valide
	3	174,81	-9,45	450,65	valide
	4	222,87	8,01	450,65	valide
	5	151,96	-82,60	450,77	valide
8 Cluster	1	175,05	-12,25	450,65	valide
	2	239,43	-23,48	450,65	valide
	3	239,43	-23,48	450,65	valide
	4	279,95	9,31	450,74	nicht valide
		226,52	71,02	450,87	valide
	5	170,47	-53,27	450,65	valide

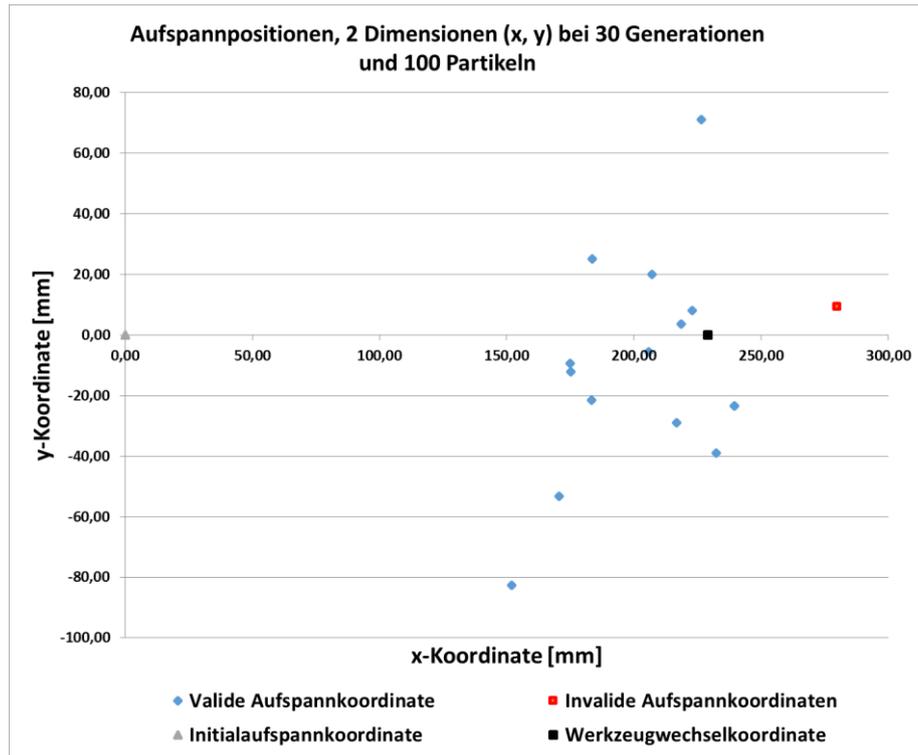


Abbildung 55: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 100 Partikeln

Tabelle 20: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 30 Generationen und 100 Partikeln

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, θ); Abbruchkriterium: 30 Generationen; Schwarmgröße: 100 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	217,12	1,90	-311,51	450,59	valide
	2	214,34	-68,22	50,04	450,85	valide
	3	241,47	31,65	-187,41	450,69	valide
	4	238,15	-12,02	-148,72	450,59	valide
	5	247,79	0,76	82,77	450,63	nicht valide
		224	22	338	450,64	valide
6 Cluster	1	201,85	12,12	-97,08	450,67	valide
	2	233,81	-8,12	-230,03	450,59	valide
	3	195,56	6,29	339,14	450,70	valide
	4	244,80	-9,43	-306,14	450,60	valide
	5	216,83	26,15	301,78	450,66	valide
8 Cluster	1	225,46	47,34	75,10	450,81	valide
	2	207,75	-9,77	306,76	450,63	valide
	3	239,75	-12,01	-128,79	450,59	nicht valide
	4	147,38	-43,06	-39,23	450,94	valide
	5	253,04	7,21	328,16	450,67	nicht valide
		190,07	7,39	123,58	450,73	valide
		215,72	-4,18	142,68	450,59	valide

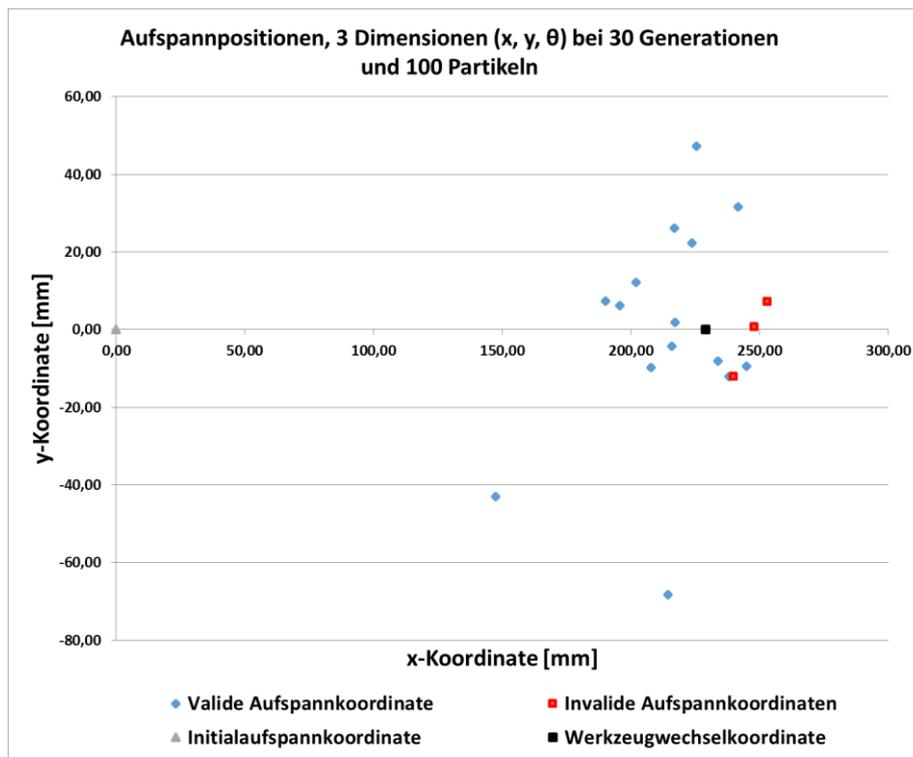


Abbildung 56: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 30 Generationen und 100 Partikeln

Die Ergebnisse unter drei Dimensionen, 30 Generationen und 100 Partikeln (vgl. Tabelle 20) zeigen, dass bei 4 Clustern der Versuch Nr. 5 invalide ist, wodurch der nachfolgende nächstbessere Cluster mit einer vergleichsweise schlechteren Zykluszeit identifiziert wird. Die mittlere t_{ZN} beträgt 450,67 s, was zu einer mittleren Reduzierung von 2,53 s führt. Die Minima treten in den Versuchen Nr. 1 und Nr. 4 auf und betragen eine identische Zykluszeit in Höhe von 450,59 s bei einer Orientierung von $\theta = -311,51^\circ$ und $\theta = -148,72^\circ$. Als größte Reduzierung konnte damit 2,61 s erreicht werden.

Alle Versuche für 6 Cluster sind valide. $t_{NZ,mittel}$ beträgt 450,64 s (mittlere Reduzierung ist 2,56 s) und t_{ZNmin} beträgt 450,59 s (Versuch Nr. 2) bei $\theta = -230,03^\circ$. Bei 8 Clustern beträgt die mittlere Zykluszeit 450,74 s (mittlere Reduzierung: 2,46 s), und das Minimum ist in Versuch Nr. 5 mit 450,59 s erreicht, was zu einer Reduzierung von 2,61 s führt ($\theta = 142,68^\circ$). Das Minimum wurde auch bei Versuch Nr. 3 erreicht, wobei hier die Koordinaten ($x = 239,75$ mm; $y = -12,01$ mm, $\theta = -128,79^\circ$) zu einer invaliden Aufspannposition führen und dadurch unmittelbar ein nachfolgendes Koordinatenpaar mit „schlechterer“ (höherer) Zykluszeit (450,94 s) aus der Cluster-Lösungsmenge zur Überprüfung durch die Simulation bereitgestellt wird.

Abbildung 56 gibt hierzu einen Überblick über die Aufspannlage der beschriebenen Versuchsreihe bei 30 Generationen und 100 Partikeln. Auch hier sind valide und invalide Positionen rechts von der Werkzeugwechselkoordinate identifizierbar, bei der die Vali-

dität voraussichtlich durch die veränderte Aufspannorientierung θ der einzelnen Positionen beeinflusst wird. Dabei liegen die Versuche Nr. 2 bei 6 Clustern und Nr. 3 bei 8 Clustern mit geringen Unterschieden bei den x - und y -Koordinaten beinahe in unmittelbarer Nachbarschaft zueinander, wobei der Winkel θ einen Differenzbetrag von $101,24^\circ$ aufweist und diese hohe Differenz ein Indiz dafür ist, dass die Aufspannorientierung einen hohen Einfluss haben kann.

Bei den Experimenten unter der Konfiguration von 50 Generationen und 50 Partikeln im zweidimensionalen Aufspannbereich (vgl. Tabelle 21) sind ausschließlich valide Aufspannkoordinaten generiert worden.²⁰⁷ Die mittlere Zykluszeit und gleichzeitig auch das Minimum für alle Versuche betragen jeweils 450,65 s, was eine Reduzierung um 2,55 s ausmacht. Die Lageverteilung der Partikel verweist dabei auf zwei Gebiete (vgl. Abbildung 57), bei denen sich die Positionen ansammeln und zu identischen Zykluszeiten führen, wenn auch die Distanzen zum Werkzeugwechsellpunkt unterschiedlich hoch sind. Da die x -Achse einen hohen Verfahrenweg-Anteil beinhaltet (im Vergleich zur y -Achse), sind die Unterschiede marginal (wenige Millimeter), was bei der Zeitmessung keine hohen Unterschiede ausmacht und sich allgemein in Rundungsdifferenzen (hier zwei Stellen nach den Komma) niederschlägt.

Tabelle 21: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{zv} bei 50 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 50 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x , betreffend X-Achse [mm]	y , betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	193,27	-16,65	450,65	valide
	2	219,79	25,30	450,65	valide
	3	202,64	-0,67	450,65	valide
	4	208,56	-8,28	450,65	valide
	5	210,38	29,92	450,65	valide
6 Cluster	1	204,08	-2,41	450,65	valide
	2	173,27	-4,05	450,65	valide
	3	216,32	-6,81	450,65	valide
	4	185,43	-22,27	450,65	valide
	5	169,45	25,30	450,65	valide
8 Cluster	1	215,07	29,38	450,65	valide
	2	204,37	28,38	450,65	valide
	3	197,96	29,38	450,65	valide
	4	202,15	32,98	450,65	valide
	5	234,69	-17,21	450,65	valide

²⁰⁷ Das hängt mit der Zufälligkeit der Partikelinitialisierung zusammen, die beim Start der Applikation für das Aufspannverfahren I erfolgt. Dass hierbei ausschließlich valide Aufspannpositionen generiert wurden, ist keine fest anzunehmende Regel und trat hier im Rahmen der Experimente einmalig auf.

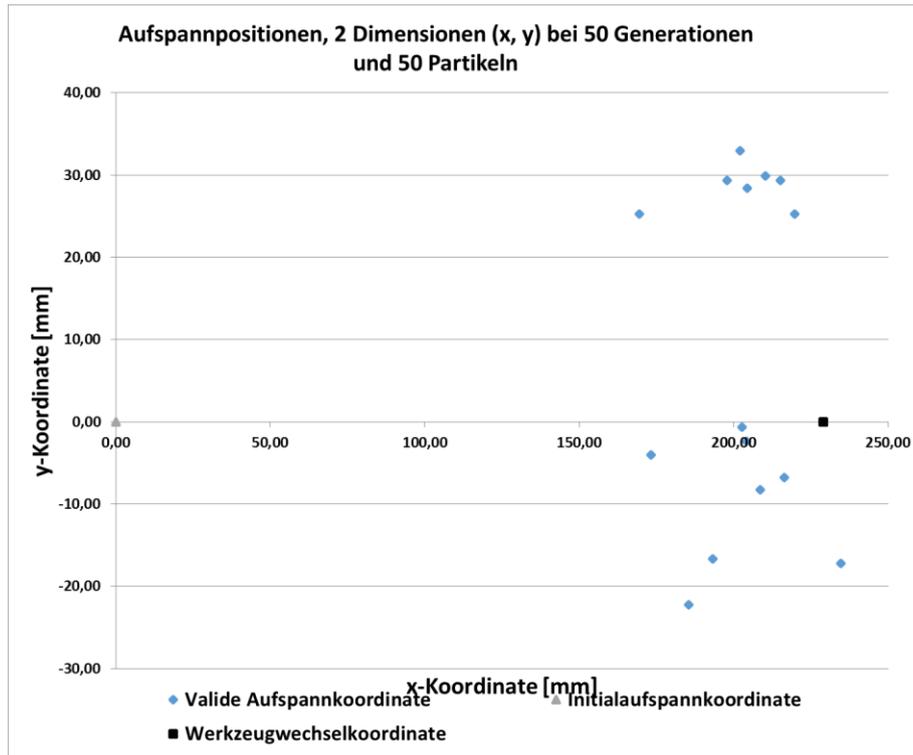


Abbildung 57: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 50 Partikeln

Tabelle 22: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, θ); Abbruchkriterium: 50 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, tZN [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	217,30	7,06	224,68	450,59	valide
	2	216,04	1,20	126,07	450,59	valide
	3	237,94	-0,52	237,74	450,59	nicht valide
		247,24	-3,75	96,34	450,62	nicht valide
	4	170,89	19,74	228,10	450,81	valide
6 Cluster	4	234,73	1,92	-292,97	450,59	valide
	5	236,04	-2,42	-193,21	450,59	valide
	1	215,03	-2,02	35,55	450,59	valide
	2	219,71	-0,27	188,16	450,59	valide
	3	232,96	1,55	-141,44	450,59	valide
8 Cluster	4	226,04	2,69	-57,23	450,59	valide
	5	232,78	-1,29	-204,36	450,59	valide
	1	232,91	9,73	234,91	450,59	valide
	2	225,84	9,20	-76,92	450,59	valide
	3	229,56	-10,08	-38,34	450,59	valide
4	228,55	-13,27	-111,74	450,59	valide	
5	217,92	-8,18	28,96	450,59	valide	

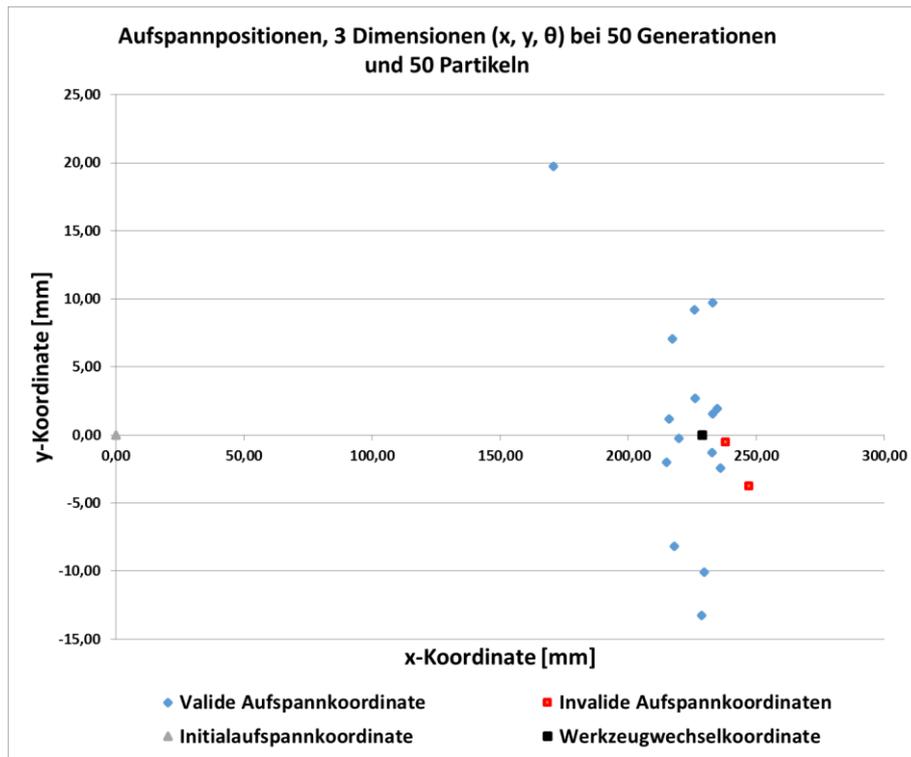


Abbildung 58: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 50 Partikeln

Aus Tabelle 22 sind bei 6 und 8 Clustern valide Aufspannpositionen identifiziert worden. Der Wert $t_{ZN,mittel}$ liegt bei der Versuchsreihe mit 6 Clustern bei 450,59 s (mittlere Reduzierung beträgt 2,61 s) und macht auch die minimale Zykluszeit aus. Die zugehörigen Werte für θ sind in der Tabelle 22 ablesbar. Die Versuchsreihe mit 8 Clustern weist identische Zykluszeiten unter verschiedenen Koordinatenausprägungen auf.

Versuch Nr. 3 ist bei der Versuchsreihe mit 4 Clustern invalide und erfordert damit zwei zusätzliche Simulationsdurchläufe (zwei weiterer Clusterwerte), wodurch mindestens zwei Lösungen der Cluster invalide sind. Das 3. Cluster ist mit aufsteigender Zykluszeit valide, wodurch das vierte Cluster nicht mehr zur Prüfung herangezogen wurde. Die mittlere Zykluszeit beträgt hier 450,63 s, was eine mittlere Reduzierung um 2,57 s erbringt. Die minimalen Zykluszeiten betragen bei allen Versuchen außer Nr. 3 450,59 s, was eine Reduzierung um 2,61 s mit sich bringt. Bei der Betrachtung von Versuch Nr. 5 und Versuch Nr. 3 wird bei der Reihe mit 4 Clustern deutlich, dass hier die Grenze zwischen Validität und Invalidität auf der x -Achse zwischen 236 mm und 238 mm liegt (kurz hinter der Werkzeugwechselkoordinate). Die y -Werte weichen in geringem Maße ab, jedoch kann postuliert werden, dass die Ausprägungswerte für θ hier ebenfalls ausschlaggebend zu sein scheinen. Die Lage der Positionen, wie in Abbildung 58 gezeigt, befinden sich hauptsächlich auch hier in der näheren Nachbarschaft des Werkzeugwechsellpunkts, wobei keine klare Trennung zwischen den validen und invaliden Positionen auszumachen ist.

Im Vergleich der Aufspannverfahren I unter 50 Generationen und 50 Partikeln sind zwischen den Dimensionen 2 und 3 kaum Unterschiede zeitlicher Art erkennbar, sodass hierbei sogar ein weniger komplexeres Suchverfahren durch zwei Dimensionen ausreichen würde.

Bei den Versuchen der zweidimensionalen Aufspannpositionierung bei 50 Generationen und 100 Partikeln (vgl. Tabelle 23) wurden unabhängig von der Clusterkonfiguration keine invaliden Lösungen identifiziert. Die unterschiedlichen Koordinaten weisen untereinander geringe Abweichungen auf und bilden zwei Positionierungsgebiete, was in Abbildung 59 deutlich ist. Zudem führen die unterschiedlichen Positionen zu identischen Zykluszeiten mit 450,65 s, was eine Reduzierung von 2,55 s erbringt.

Ein vergleichbarer Sachverhalt ist bei den Experimenten mit 50 Generationen und 50 Partikeln und einer dreidimensionalen Aufspannpositionierung beobachtbar. Zur Veranschaulichung dienen Tabelle 24 und Abbildung 60. Hierbei ist die Zykluszeit bei allen Versuchen identisch und beträgt 450,59 s, was eine Reduzierung von 2,61 s ausmacht.

Tabelle 23: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 100 Partikeln

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 50 Generationen; Schwarmgröße: 100 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	184,42	26,55	450,65	valide
	2	219,81	-8,51	450,65	valide
	3	193,45	32,08	450,65	valide
	4	212,46	-4,78	450,65	valide
	5	212,06	30,02	450,65	valide
6 Cluster	1	179,61	-22,08	450,65	valide
	2	203,08	26,04	450,65	valide
	3	206,84	-2,48	450,65	valide
	4	205,45	-22,29	450,65	valide
	5	212,49	30,89	450,65	valide
8 Cluster	1	208,21	-11,59	450,65	valide
	2	217,89	-11,54	450,65	valide
	3	205,65	-14,56	450,65	valide
	4	227,48	24,26	450,65	valide
	5	240,59	28,04	450,65	valide

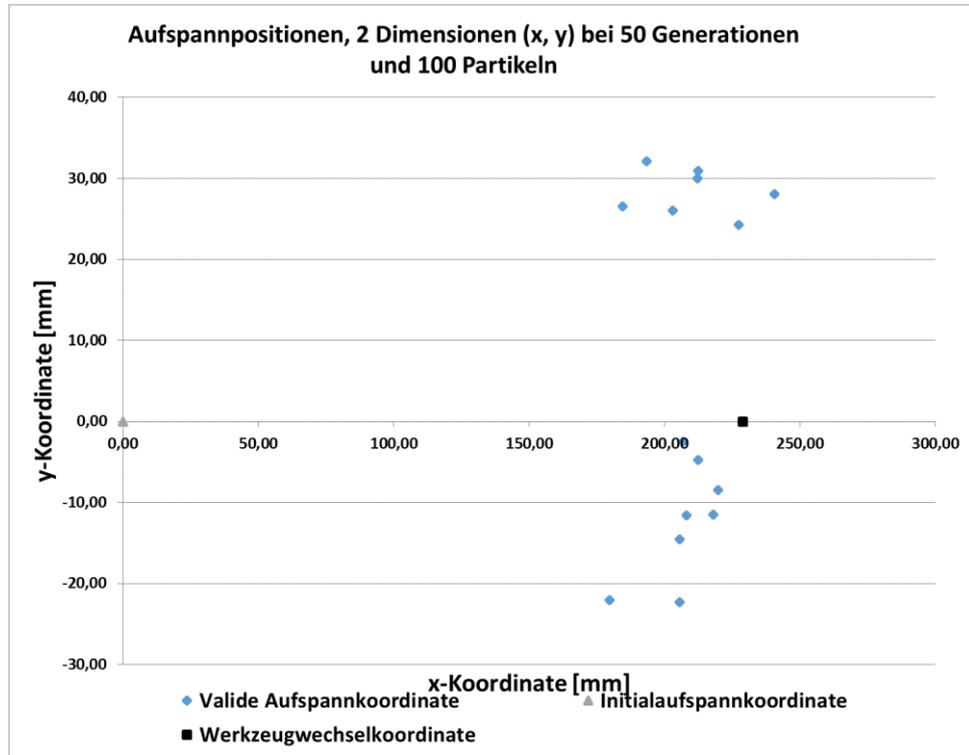


Abbildung 59: Aufspannkoordinaten bei 2 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 100 Partikeln

Tabelle 24: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei 3 Dimensionen und identifizierter t_{ZN} bei 50 Generationen und 100 Partikeln

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, θ); Abbruchkriterium: 50 Generationen; Schwarmgröße: 100 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	225,79	1,92	-161,05	450,59	valide
	2	224,55	-1,05	76,23	450,59	valide
	3	219,06	4,80	222,13	450,59	valide
	4	223,11	2,87	241,92	450,59	valide
	5	220,51	-5,30	-206,82	450,59	valide
6 Cluster	1	224,64	-9,34	58,89	450,59	valide
	2	231,84	-6,23	267,42	450,59	valide
	3	214,68	-1,94	-42,14	450,59	valide
	4	236,52	-1,12	218,74	450,59	valide
	5	217,11	3,04	11,43	450,59	valide
8 Cluster	1	219,16	-13,79	-298,23	450,59	valide
	2	230,53	6,77	-147,83	450,59	valide
	3	235,94	-8,79	276,03	450,59	valide
	4	215,49	-1,71	-30,07	450,59	valide
	5	222,98	3,48	-20,06	450,59	valide

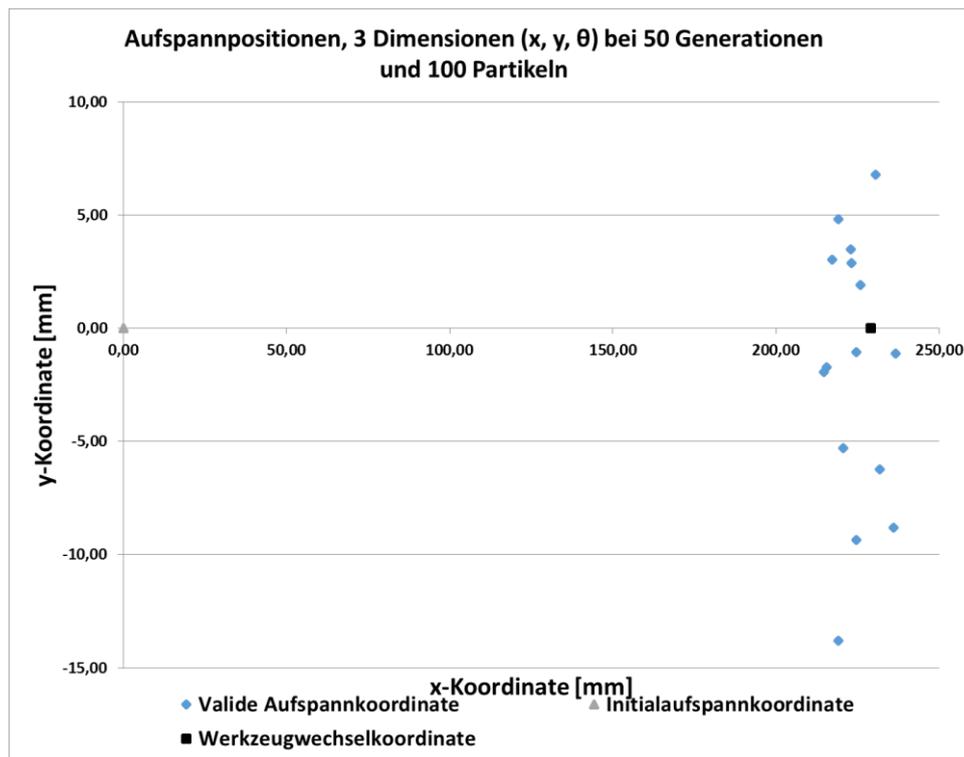


Abbildung 60: Aufspannkoordinaten bei 3 Dimensionen und 4, 6 und 8 Clustern bei 50 Generationen und 100 Partikeln

Die Anwendung des zwei- und dreidimensionalen Aufspannverfahrens I unter abweichenden Konfigurationen, wie z. B. eine diversifizierende Partikel- und Generationenanzahl, bringen insgesamt keine deutliche Verbesserungen mit sich. Dieses Verhalten ist gerade bei 50 Generationen und 50 sowie 100 Partikeln auffällig. Dafür werden hier häufig valide Aufspannpositionen beim ersten Durchlauf gefunden, was aber nicht bzw. nur bedingt auf die Konfiguration des Suchverfahrens durch einen größeren Schwarm und ein höheres Stoppkriterium zurückzuführen ist. Somit kann die Standardkonfiguration vorerst eingehalten werden.

Werkstückpositionierung bei Einbeziehung der Koordinate z :

Die Überprüfung der Werkstückpositionierung für drei Dimensionen (x , y und z) sowie vier Dimensionen (x , y , z und θ) ist exemplarisch mit der Konfiguration von 20 Generationen und 50 Partikeln in der ersten Phase des Aufspannverfahrens durchgeführt und für die zweite Phase jeweils mit 4, 6 und 8 Clustern erprobt worden. Diese Fälle werden hier insgesamt sekundär betrachtet, da die Variation der z -Koordinate nur dann einen praktischen Nutzen hat, wenn das Spannmittel an die Werkstückpositionshöhe (z -Richtung) angepasst werden kann. Theoretisch ist es simulationsseitig möglich, das Werkstück innerhalb der Tischmaterie aufzuspannen, was jedoch physikalisch (bei realen Maschinen) unmöglich und daher als ungültige Koordinate definiert ist.

Bei den Versuchen mit drei Dimensionen ist anzumerken, dass z. T. keine bessere Lösung gefunden wurde als die initiale Werkstückpositionierung, die zu $t_{ZN} = 453,20$ s führt. Einige invalide Ergebnisse resultieren daraus, dass die z -Koordinate als $z < 200$ mm²⁰⁸ vorgeschlagen wird, wodurch das Spannmittel in den Maschinentisch hineingeraten würde. Tabelle 25 zeigt dazu die Versuchsergebnisse. Die mittleren Zykluszeiten für die Cluster 4, 6 und 8 betragen 452,27 s, 452,66 s und 452,40 s unter Einbeziehung der validen Ergebnisse, was eine geringe Verbesserung darstellt.

Ähnliche Ergebnisse zeigen sich bei den Versuchen mit 4 Dimensionen, wobei auch hierbei eine hohe Anzahl invalider Ergebnisse zu verzeichnen ist. Zur Verbesserung ist es hier sinnvoll, den Suchraum auf den Wertebereich zu beschränken, der oberhalb der Arbeitstischoberfläche liegt. Auch könnte zur Vollständigkeit analysiert werden, ob eine Verbesserung identifizierbar ist, wenn die Generationenzahl sowie die Schwarmgröße der Metaheuristik erhöht werden oder zumindest variieren. Die mittleren Zykluszeiten für die Cluster 4, 6 und 8 betragen hier 452,16 s, 452,92 s und 452,77 s, wodurch eine geringe Zeitreduzierung zu beobachten ist. Das hängt vor allem damit zusammen, dass die initiale Werkstückpositionierung teilweise bereits die hierfür beste Lösung darstellt, da alle zykluszeitreduzierenden Koordinaten zu invalide Aufspannlösungen (Kollision) führen. Eine Übersicht über die Versuche zeigt Tabelle 26.

²⁰⁸ Hier ist die Zählrichtung der Maschinenachsen zu beachten, die von der NC-Parser-Applikation abweichen kann bzw. eine Vorzeichenumkehrung notwendig macht. Der Betrag ist jedoch identisch.

Tabelle 25: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei Einbezug der z-Koordinate und identifizierter t_{ZN} bei 20 Generationen und 50 Partikeln ohne Orientierungsänderung

Dimensionen: 3 Dimensionen (x, y, z); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/Maschineninstanzen	Versuchs-Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	z, betreffend Z-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, t_{ZN} [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	133,46	12,98	204,45	451,10	valide
	2	165,91	-49,35	344,12	451,35	valide
	3	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
	4	320,99	18,58	123,20	451,87	nicht valide
	5	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
	6	206,66	52,73	235,39	450,79	valide
	7	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
	8	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
	9	236,23	104,29	217,00	451,61	valide
	10	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
6 Cluster	1	339,99	-13,25	299,87	451,82	valide
	2	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
	3	0,00	0,00	200,00	Initiale Zykluszeit	valide
	4	63,27	77,86	133,64	452,22	nicht valide
	5	63,27	77,86	133,64	452,22	nicht valide
	6	303,01	111,93	312,72	451,81	nicht valide
	7	108,67	53,19	69,62	452,62	nicht valide
	8	230,17	-174,65	261,18	452,42	valide
	9	267,27	-154,43	109,96	452,27	nicht valide
	10	252,22	-26,98	296,25	450,74	nicht valide
8 Cluster	1	0,00	0,00	200,00	453,00	valide
	2	213,81	5,65	394,17	452,15	valide
	3	55,60	-82,19	99,10	452,48	nicht valide
		102,06	134,36	198,17	452,09	nicht valide
		140,92	163,04	329,71	452,55	valide
	4	176,61	-151,94	126,47	452,91	nicht valide
		75,08	131,05	211,79	452,16	valide
	5	171,23	44,81	167,63	451,19	nicht valide
		195,51	-94,57	213,85	451,13	valide
	6	-	-	-	-	-
7	0	0	200	453	valide	
8	325,60	9,29	206,60	451,57	nicht valide	
	328,64	-3,82	229,69	451,62	nicht valide	
9	26,83	30,81	292,73	452,77	valide	
10	221,36	-83,74	66,24	452,66	nicht valide	

Tabelle 26: Identifizierte Positionen der Versuchsreihen mit 4, 6 und 8 Maschineninstanzen bei Einbezug der z-Koordinate und θ bei 20 Generationen und 50 Partikeln

Dimensionen: 4 Dimensionen (x, y, z, θ); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/Maschineninstanzen	Versuchs-Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	z, betreffend Z-Achse [mm]	θ , Orientierung [°] auf Maschinentisch	Positionsabhängige Zykluszeit laut NC-Programm, tZN [s]	Validität der Position/Kollision/Simulationsabbruch
4 Cluster	1	182,87	-128,85	249,37	55,04	451,68	valide
	2	-67,66	-625,50	-234,33	-337,90	459,63	nicht valide
		-106,72	-491,29	-60,06	-169,46	457,48	nicht valide
		-360,33	404,84	760,83	-209,56	458,97	nicht valide
	3	-43,72	-292,21	522,43	-98,23	454,47	nicht valide
		141,18	-296,14	484,40	-139,08	454,37	nicht valide
	4	396,07	-330,59	95,81	-115,31	454,91	nicht valide
		191,28	65,45	211,46	106,95	451,49	valide
	5	249,77	48,42	484,92	-298,90	452,26	valide
		329,50	315,80	-9,82	175,30	454,99	nicht valide
7	258,33	-352,05	352,52	176,26	455,25	nicht valide	
	-360,07	-74,21	66,60	198,34	458,96	nicht valide	
	-342,84	583,28	-266,91	154,51	459,27	nicht valide	
	184,77	243,27	30,88	167,63	453,83	nicht valide	
	-301,67	30,87	-159,53	-201,43	458,03	nicht valide	
8	-71,40	114,39	492,68	-8,34	454,37	nicht valide	
	99,93	-77,70	205,83	-29,47	451,60	nicht valide	
9	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide	
10	42,00	178,59	123,65	70,84	452,84	nicht valide	
6 Cluster	1	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	2	390,23	111,62	394,43	-163,537842	452,80	nicht valide
		70,77	-167,68	258,17	189,633131	452,82	valide
	3	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	4	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	5	311,83	-112,74	431,83	-112,8956646	452,76	nicht valide
	6	80,31	-61,25	138,98	148,9113292	452,16	valide
	7	26,51	154,33	226,55	107,393592	452,80	valide
	8	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	9	239,14	88,73	248,32	-108,8397924	451,56	nicht valide
10	28,08	-25,80	324,55	4,910723682	452,75	valide	
8 Cluster	1	39,74	74,35	363,81	28,74	452,57	valide
	2	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	3	386,38	110,45	217,67	199,03	452,98	nicht valide
	4	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	5	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
	6	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide
		254,89	-42,10	242,31	1,69	450,56	nicht valide
	7	223,17	130,42	369,59	66,01	452,25	valide
		150,56	18,07	342,48	52,92	451,33	valide
	9	214,62	111,80	309,30	50,54	451,78	nicht valide
10	0,00	0,00	200,00	0,00	Initiale Zykluszeit	valide	

6.2.2.1 Analyse der Werkzeugwechselfade im Zusammenhang mit der Werkstückposition

Wenn die geometrische Lage der Aufspannkoordinaten auf der Maschinentischoberfläche abgebildet wird, kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse (Koordinaten) der Versuchsreihen in die Nachbarschaft der Werkzeugwechselkoordinate konvergieren. Je mehr Werkzeugwechsel in einem NC-Programm und somit auch durch die Parser-Applikation berücksichtigt werden, desto deutlicher „reagiert“ der zweistufige Ansatz des Aufspann-

verfahrens I: Die Werkzeugwechselfade nehmen eine deutlich ansteigende Zeit in Anspruch, wenn die Aufspannposition des Werkstücks eine hohe Distanz zum Werkzeugwechselfunkt aufweist. Die Werkzeugwege, die die Hauptzeit betreffen und damit nur in unmittelbarer Nähe des Werkstücks stattfinden, sind dadurch geringer gewichtet.

Zur Unterstützung dieser Feststellungen erfolgt eine Auswertung der Zeitmessungen durch die NC-Parser-Applikation als Fitnesskomponente des zweistufigen Ansatzes in Tabelle 27. Dazu sind Versuche aus der zweidimensionalen Werkstückpositionierung mit 4 Clustern (20 Generationen und 50 Partikeln) ausgewählt. Die übrigen Versuchsreihen verhalten sich nach denselben demonstrierten Gesetzmäßigkeiten. Die zeitlichen Differenzen von t_{ZN} zwischen der initialen Startaufspannung und den identifizierten Aufspannkoordinaten für die Werkstückaufspannung entstehen durch die variierende Werkstückpositionierung des zweistufigen Verfahrens. Diese Differenz ist fast ausschließlich identisch mit den Differenzen zwischen der Werkzeugwechselzeit aus der Initialaufspannung und den jeweiligen Versuchsreihen. Es ist nachgewiesen, dass sich die Reduzierung von EZZ_{NC} überwiegend in der verändernden Werkzeugwechselzeit niederschlägt. Dieses Erkenntnis ist zusätzlich zur Tatsache, dass proaktiv gültige Aufspannparameter in geringer Zeit über eine Mehrnutzerschnittstelle identifiziert werden können, als wichtige Erkenntnis zu bewerten. Zudem wird die Vermutung weiterhin gestützt, dass durch eine steigende Anzahl der Werkzeugwechsel im NC-Programm die Konvergenz der finalen Aufspannlage in Richtung Werkzeugwechselkoordinate positiv korreliert, sodass der Prozess der Werkzeugwechseloperation ausschlaggebend für die Reduzierung der Zykluszeiten im Rahmen des Aufspannverfahrens I ist und eine Verbesserung der Aufspannsituation sowie der Einrichtung der Maschine erreicht wird.

Tabelle 27: Zusammenhang zwischen Reduzierung von t_{ZN} und der Werkzeugwechselzeit durch Positionskordinaten mit 2 Dimensionen

Versuchsnummer	t_{ZN} [s]	Werkzeugwechselzeit [s]	Differenz zwischen $t_{ZN,Initialaufspannung}$ u. $t_{ZN,Versuchsnummer}$	Differenz zwischen Werkzeugwechselzeiten der Initialaufspannung u. Versuchsnummer
Initialaufspannung	453,200	44,220	-	-
1	450,590	41,610	2,610	2,610
2.2	451,730	42,752	1,470	1,468
3	450,770	41,783	2,430	2,437
4	450,730	41,744	2,470	2,476
5.1	450,670	41,685	2,530	2,535
5.3	451,740	42,762	1,460	1,458
6	450,630	41,649	2,570	2,571

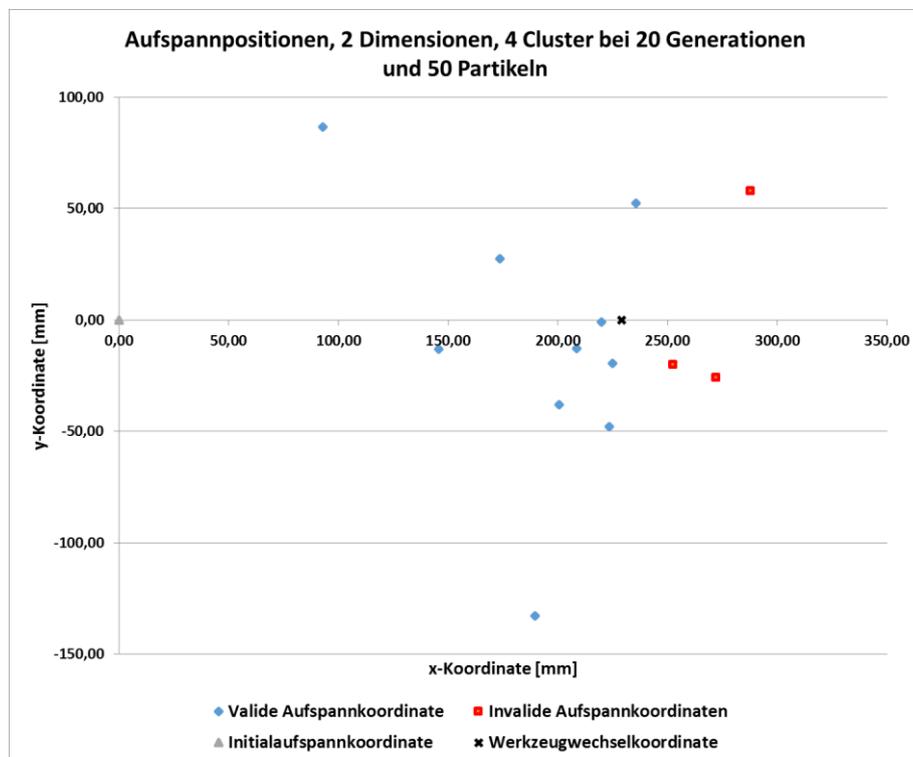


Abbildung 61: Übersicht der Lage der Aufspannkoordinate für 4 Cluster und 2 Dimensionen unter Beachtung der Tischebene im Maschinenarbeitsraum

Abbildung 61 zeigt exemplarisch die Versuchsreihen für die zweidimensionalen Aufspannpositionen aus der Tabelle 13 für 4 Cluster. Die Initialaufspannung liegt hier bei (0; 0; [Tischoberfläche]). Es wird in Erinnerung gerufen, dass die invaliden Koordinaten vermehrt rechts vom Werkzeugwechsellpunkt in Nähe der Spindelführung der Maschine in Erscheinung treten (vgl. Abbildung 49) und sich damit unmittelbar in möglicher Reichweite der Werkzeugwechsellvorrichtung und Spindel befinden, sollte die Maschinenbewegung ungünstig sein. Die Kollisionen entstehen durch den hohen Aufbau des Werkstücks, verursacht durch das erhöhte Spannmittel, sodass die Spindel nicht frei agieren kann und das Werkstück sich bei dem zugrunde liegenden NC-Programm nicht eindeutig umsteuern lässt.

Die Abbildung 62 zeigt die zugehörigen invaliden Aufspannlagen des Werkstücks in dem Simulationsmodell unter Anwendung der Koordinaten aus den Versuchen (Nachfolgewerte bei Invalidität der ersten erprobten Koordinaten) 2.1, 5.1 und 5.2 (2 Dimensionen, 4 Cluster). Die Werkzeugwechselregion ist ebenfalls durch den gestreift markierten Bereich angedeutet, der über dem Werkstück und Spannmittel liegt. Der Werkzeugwechsellpunkt liegt dabei an der rechten Kante der Markierung. Es wird ebenfalls deutlich, dass das Spannmittel einen Überhang über den Maschinentisch bildet, was aber nur bei visueller Darstellung feststellbar wird. Auf Ebene der Koordinaten und unter Anwendung des

Aufspannverfahrens I wird dieser Sachverhalt nicht deutlich, sodass hier nur die Information „valide“ und „invalide“ ausschlaggebend ist.

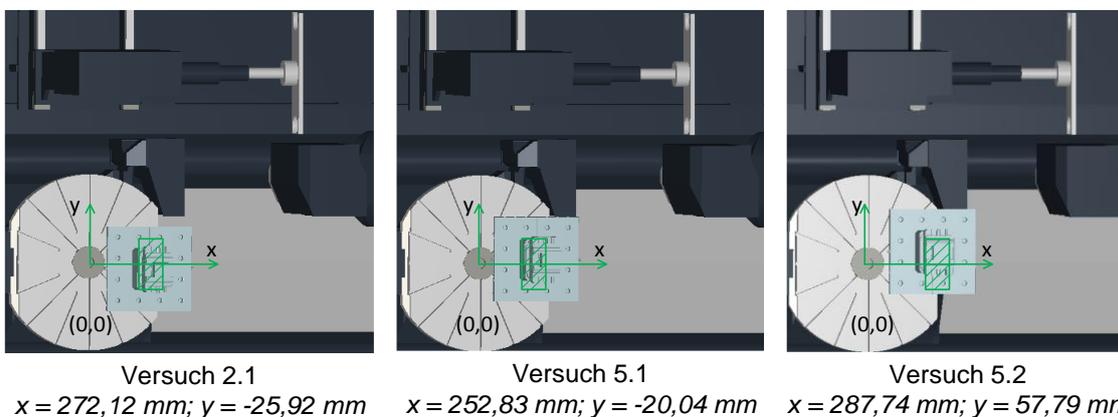


Abbildung 62: Invalide Aufspannpositionen

Bezug nehmend auf die Tabelle 27 sind die Zusammenhänge zwischen reduzierter t_{ZN} und variierenden Aufspannkoordinaten mit verbundenem Verfahrensweg zum Werkzeugwechsellpunkt durch die Diagramme in Abbildung 63 und Abbildung 64 veranschaulicht. Dabei sind in Abbildung 63 die Werkzeugwechselzeiten²⁰⁹ orange markiert und t_{ZN} ist jeweils in Blau eingefärbt (vgl. Legende in Abbildung 61). Die graue Markierung bezieht sich auf t_{ZN} durch die Initialaufspannung des Werkstücks auf dem Maschinentisch, und die rot markierte Versuchsnummer bezieht sich auf exemplarisch gezeigte ungültige Aufspannkoordinaten. Hierbei wird deutlich, dass die Zykluszeit t_{ZN} sich bei den Versuchen nicht signifikant ändert bzw. nur geringe Abweichungen zu verzeichnen sind (genauere Werte vgl. Tabelle 27). Jedoch variieren hierbei vermehrt die Anteile der Zykluszeit t_{ZN} , die sich auf die Werkzeugwechsellvorgänge beziehen.

In Abbildung 64 ist die Differenz der Werkzeugwechselzeiten zwischen dem jeweiligen Folgeversuch (angegeben mit der Versuch-Nr.) und der Initialaufspannung gelb und die Differenz zwischen $t_{ZN, Initialaufspannung}$ und $t_{ZN, Aufspann, neu}$ grau markiert. Es ist deutlich, dass die Differenzen zwischen den eingesparten Anteilen an t_{ZN} gering abweichen, sodass sich die Hauptzeitanteile wenig unterscheiden, jedoch die Werkzeugwechselzeiten den größten Anteil der reduzierten Zykluszeit t_{ZN} ausmachen.

²⁰⁹ Die Werkzeugwechselzeiten sind durch die Ausgabe der NC-Parser-Applikation gemessen worden und geben hier die Dauer wieder, die vom Eingriffspunkt des Werkzeugs zur Werkzeugwechselkoordinate und wieder zurück zum neuen Eingriffspunkt notwendig ist.

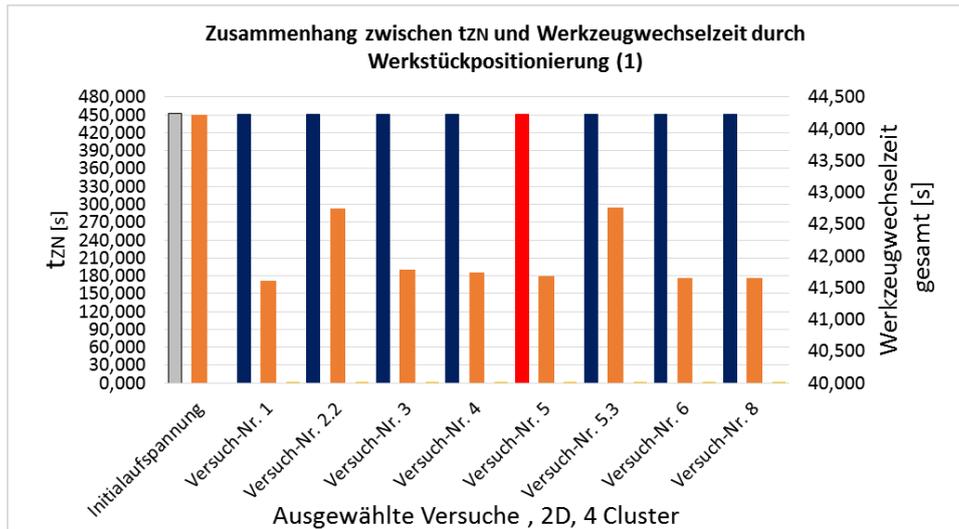


Abbildung 63: Zusammenhang zwischen t_{ZN} und der Werkzeugwechselzeit bei ausgewählten Versuchen

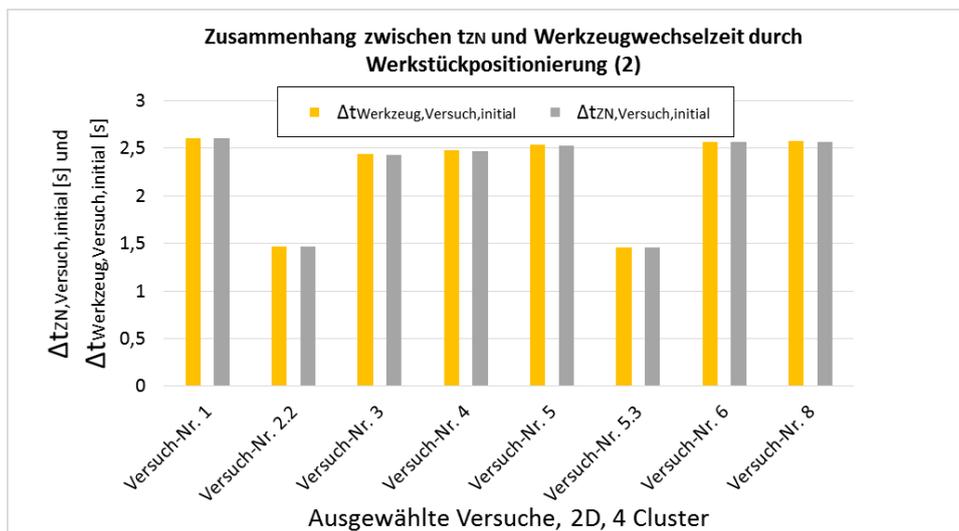


Abbildung 64: Vergleich der Differenzen von $t_{ZN, Initialaufspannung}$ und $t_{ZN, Versuch}$ sowie zwischen den Werkzeugwechselzeiten bei ausgewählten Versuchen

6.2.2.2 Besonderheiten bei der Orientierungsänderung durch θ

Bei Betrachtung der reinen Variation der Werkstückorientierung von Werkstück A in dem vorgesehenen Intervall für $\theta \in [0; 2\pi]$ ²¹⁰ kristallisierte sich heraus, dass die minimale erweiterte Zykluszeit $t_{ZN,min}$ 302,171 s beträgt und bei einem Orientierungswinkel von $\theta = \{150^\circ; 240^\circ; 330^\circ\}$ auftritt.²¹¹ Die Analyse hierzu erfolgte durch Variation der Aufspannorientierung in diskreten Fünf-Grad-Abständen und unter automatischer Aufspann-

²¹⁰ Aus Gründen der Bedienbarkeit und Übermittlung der Aufspannpositionen in das Simulationsmodell sind die Aufspannorientierungswinkel in Grad umgerechnet.

²¹¹ Hierzu werden bereits erste Experimente in dem Beitrag von Weber et al. (vgl. [WRS+16]) gezeigt.

überprüfung durch die virtuelle Werkzeugmaschine. Alle ermittelten Aufspannorientierungen führen zu einem validen Ergebnis ohne ungewollte Kollision, was dahingehend sehr naheliegend ist, da keine translatorische Veränderung vorgenommen wurde und damit die initialen Koordinaten für x und y konstant bleiben. Zudem ist das Werkstück A ein symmetrisches Bauteil, sodass diese beobachtete Periodizität durch wiederkehrende äquivalente Achswege und Aufspannwinkel erklärbar ist.

Als Initialaufspannung wurde $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 90^\circ$ gewählt, die jeweils zu $t_{ZN,initial} = 303,19$ s führen. Damit beträgt die Zeitersparnis durch die Orientierungsänderung zwischen $t_{ZN,initial}$ und $t_{ZN,min}$ 1,019 s. Die maximale $t_{ZN,max}$ wurde bei $\theta = \{100^\circ; 280^\circ\}$ erreicht. Damit liegt eine maximale Zeitersparnispanne von 1,028 s vor. Die Werkzeugwechselzeit bleibt bei diesem Ansatz konstant, sodass sich diese Zeitersparnis nur auf die Grundlage der variierenden Hauptzeit bezieht. Über alle gewählten Orientierungswinkel verursachen zudem die G-Befehle für die lineare Bahninterpolation G1 sowie die Kreisinterpolationen G2 konstante Hauptzeitanteile. Nur der G0-Befehl sowie der G3-Befehl variiert und führen dadurch zu der beobachteten Zeitvariation, die damit allein auf die variierenden Aufspannwinkel (Orientierungsvariation) zurückzuführen ist.

Insgesamt ist die gewonnene Zeitersparnis für $\theta = \{150^\circ; 240^\circ; 330^\circ\}$ bei der alleinigen Orientierungsänderung (eindimensionale Identifikation der Aufspannkoordinaten) des Werkstücks als gering zu bewerten. Die nachfolgende Tabelle 28 zeigt die wichtigsten Randdaten, die aus der Aufspannorientierungsanalyse resultieren. Die Abbildung 65 zeigt eine Übersicht der erweiterten Zykluszeiten über die möglichen Aufspannwinkel.

Tabelle 28: Randdaten der Aufspannorientierung bei $\theta \in [0;360^\circ[$ für Werkstück A

Max. Hauptzeit [s]	Min. Hauptzeit [s]	Werkzeugwechselzeit [s]	Max. G0 [s]
291,988	290,961	11,210	6,105
Min. G0 [s]	G1 [s]	G2 [s]	Max. G3 [s]
5,897	267,308	11,636	6,934
Min. G3 [s]			
6,097			

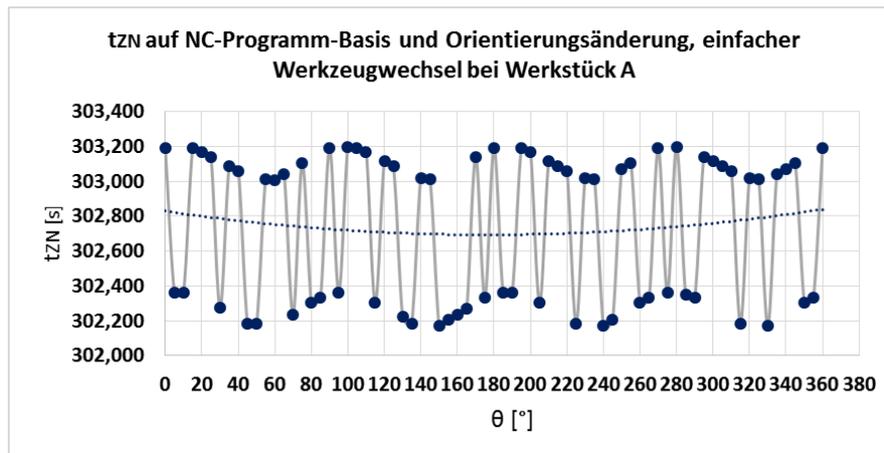


Abbildung 65: Übersicht über die Zeitentwicklung von t_{ZN} im Verlauf der diskreten Variation des Aufspanorientierungswinkels θ

Ein weiterer interessanter Analyseaspekt ist die Variation der kumulierten Verfahrenswege²¹² der Spindel und des Werkzeugs (y - und z -Achse) sowie des Maschinentischs (x -Achse) in Abhängigkeit der Aufspanwinkel. Damit lässt sich die Aufspanorientierung identifizieren, die für eine bestimmte Achse die geringsten kumulierten Achsverfahrwege aufweist. Wie die Gleichungen 5.38 und 5.39 zeigen, können auf diese Weise gewünschte Leistungsanteile der Fertigung für bestimmte Achsen angestrebt sowie die Arbeit angepasst werden. Diese Anpassungen können z. B. als Ziel definiert werden, bei dem während der Fertigung die Anzahl der translatorischen Maschinentischbewegungen, die hier die x -Achse der Maschine in dem kinematischen Modell repräsentieren, verringert werden soll. Dann wäre es sinnvoll, den Orientierungswinkel für das Werkstück zu identifizieren, der die minimalen Achsbewegungen auf der betreffenden Achsrichtung vollzieht.

Für das Werkstück A ist in Abbildung 66 eine Übersicht für θ und die identifizierten kumulierten Achswege aufgeführt. Durch die Symmetrie des Bauteils ist für die Analyse die Betrachtung der Aufspanorientierung von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 180^\circ$ ausreichend. Bei Werkstück A wurden für die x -Achse die minimalen kumulierten Verfahwege in Höhe von $S_x^{kum} = 1884,829$ mm bei den Winkeln $\theta = 90^\circ$ und $\theta = 270^\circ$ erreicht. Die zu S_x^{kum} gehörigen identifizierten Verfahwege für die y -Achse betragen 6767,185 mm. Die minimalen Verfahwege für die y -Achse weisen das Minimum mit 1812,83 mm bei $\theta = 0^\circ$ bzw. 360° und bei 180° auf. Die zugehörigen identifizierten kumulierten Verfahwege für die x -Achse betragen 6839,184 mm. Die kumulierten Verfahwege für die z -Achse bleiben konstant mit 2691,00 mm.

Die Minimierung der Verfahwege für eine Achse kann dann sinnvoll sein, wenn bestimmte Toleranzen am Werkstück eingehalten werden sollen und auf die Bewegung wei-

²¹² Die Verfahwegeaufteilung in y , z als spindelnahe Achsen und x als translatorische Achse, ausgehend vom Maschinentisch, hängt mit dem kinematischen Aufbau des zugrunde liegenden vWZM-Modells zusammen.

terer Achsen mit schweren Komponenten, wie hier die Tischbewegung (x -Achse), verzichtet oder diese minimiert werden soll, sodass sich nur die übrigen Achsen vermehrt bewegen. Damit sind eventuelle Schwingungen von Seiten der entlasteten Achse im besten Fall vollständig vermieden bzw. minimiert.

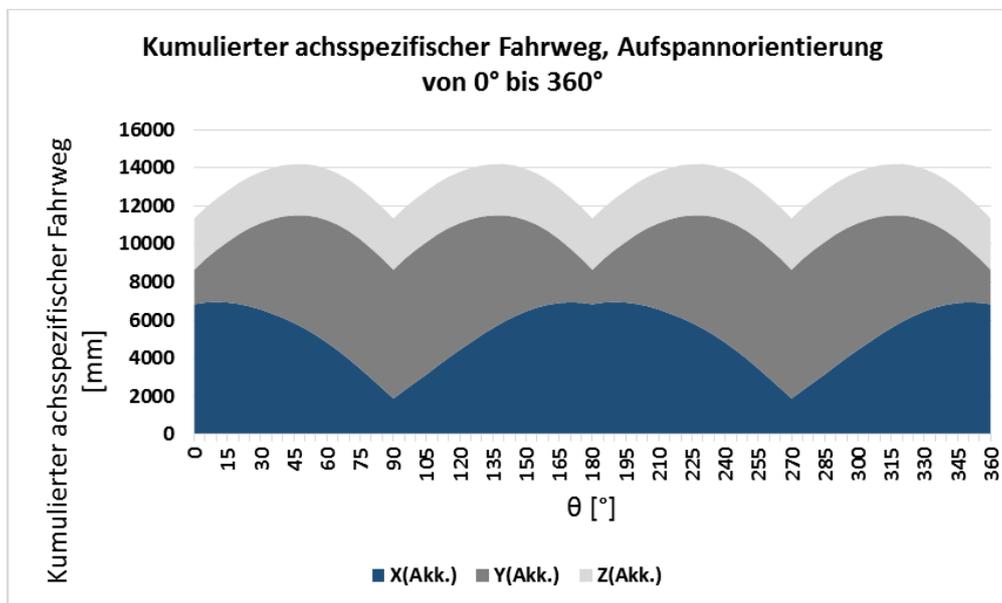


Abbildung 66: Kumulierte Verfahwege der Achsen während der Fertigung mit der Aufspanorientierung von 0° bis 360° für Werkzeug A

Um die Leistung P anzupassen oder die Arbeit W zu verringern, ist die Aufspanposition zu wählen, die die minimale kumulierte Verfahwegstrecke verursacht. Das heißt, dass die minimale gesamte kumulierte Verfahwegstrecke durch die dazugehörige t_{ZN} dividiert wird (nach Gleichung 5.33, $\Delta s = S_{gesamt,min}^{kum}$, $\Delta t = t_{ZN}$). Dieser Faktor macht P_{min} aus, da die Masse und die Beschleunigung der Werkzeugmaschine konstant bleiben und vom Werker im Rahmen der Aufspanvariation nicht bzw. nur bedingt beeinflusst werden können. Es ist zu beachten, dass für die hier ermittelte Leistung die durchschnittliche Gesamtgeschwindigkeit für die Bauteilfertigung anhand der (erweiterten) Zykluszeit und der Verfahwege der Maschine ermittelt wurde, mit der sich das Werkstück vollständig fertigen lässt, ohne dabei das NC-Programm im Detail, insb. die Vorschubgeschwindigkeiten als solches zu betrachten. Es wird nicht die Maschinenleistung für die einzelnen Zyklen betrachtet, sondern die Leistung, die für die Fertigung notwendig ist und die betrachteten Zielgrößen wie z. B. t_{ZN} beinhaltet.

Spezifikation der Massen und Beschleunigung zur Beurteilung der Leistung P und Arbeit W

Für die Masse m als konstante physikalische Größe kann für die x -Achse das Leergewicht des Tisches zuzüglich Spannmittel in Betracht gezogen werden. Sollte die Rohteilmasse ebenfalls eingefügt werden, dann ist zu beachten, dass sich die Rohteilmasse im Ferti-

gungsverlauf reduziert, sodass die Masse $m_{\text{Rohteil,Zustand 1}}$ sich in Abhängigkeit des Materialabtragsvolumens MV oder des Zeitspanvolumens Q [mm^3/min], wenn es sich auf die zeitliche Dimension t [s] bezieht, verändert:

$m_{\text{Rohteil,Zustand 1}}(MV)$ oder $m_{\text{Rohteil,Zustand 1}}(Q, t, \rho)$ sind zu beachten.

ρ beschreibt die Dichte des Werkstoffes, die z. B. für einen unlegierten Baustahl E335 bei 293,15 K Raumtemperatur $7,85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm^3 beträgt (vgl. [Thy11-ol]). Die Zeit t kann hier als $t = t_H = EZZ_{NC} - t_{NZ} - t_{\text{Werkzeuge}}$ definiert werden. Diese Größe ist notwendig, um, ausgehend vom Zeitspanvolumen, einen neuen diskreten Massezustand $m_{\text{Rohteil,Zustand 2}}$ zu ermitteln.

Die Masse m , die sich auf die x -Achse bezieht (m_x), ist ausreichend erläutert worden. Die Massen, die sich auf die y - und z -Achse beziehen, sind auf die Spindel der Maschine bezogen und losgelöst von dem Maschinentisch zu betrachten. Die sich dadurch ergebenden Massen m_y und m_z können gleichgesetzt werden. Die Masseveränderung hängt nur von dem eingewechselten Werkzeug ab: $m_y = m_z = m_{yz}(m_{\text{Werkzeug } n, NC})$. Aus Vereinfachungsgründen wird hier empfohlen, das arithmetische Mittel der Werkzeugmassen aller Werkzeuge zu verwenden, die für die Fertigung mit dem zugrunde liegenden NC-Programm notwendig sind. Dabei wird jedes Werkzeug eines Werkzeugtyps nur einmal in die Berechnung aufgenommen, auch wenn ein mehrfacher Einsatz geplant ist:

$$m_{yz} = m_{\text{spindel}} + \bar{m}_{\text{Werkzeug } n, NC} = m_{\text{spindel}} + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_{\text{Werkzeug } n} \quad (6.2)$$

Die Beschleunigung a_x erfasst die Beschleunigung des Maschinentisches (Achsbeschleunigung nach Herstellerangaben). a_y und a_z definieren die Beschleunigung der translatorischen Bewegungen der Werkzeugspindel (nach Herstellerangaben).

Resultat der minimalen kumulierten Verfahrswege durch die Aufspanorientierung θ für Werkstück A und der daraus resultierende Faktor für die Leistung P und Arbeit W

Bei dem vorliegenden Werkstück gibt es dazu mehrere Lösungen, die $S_{\text{gesamt}}^{\text{kum}}$ minimal werden lassen. Für die Winkel $\theta = 150^\circ$, $\theta = 240^\circ$, $\theta = 330^\circ$ lassen sich Werte für $S_{\text{gesamt,min}}^{\text{kum}} = 12143,8251$ mm ausmachen, was auch dem globalen Minimum entspricht. Die kumulierte Verfahrswegsumme ist hierbei die Resultierende der Verfahrswege der jeweiligen Achsen (x , y und z). Die identifizierte Zeit $t_{ZN,min} = 302,171$ s und die damit verbundenen Winkel θ weisen dieselben Winkel θ auf, die bei $S_{\text{gesamt,min}}^{\text{kum}}$ auftreten, mit $\theta \in \{150^\circ; 240^\circ; 330^\circ\}$. Der Faktor, der für P_{min} nach Gleichung 5.38 berechnet werden kann, beträgt für $\theta = 150^\circ$, $\theta = 240^\circ$, $\theta = 330^\circ$ somit $40,18859$ mm/s ($v_{S_{\text{gesamt,min}}^{\text{kum}}}^{\text{res}}$). Für W_{min} ergibt sich $S_{\text{gesamt,min}}^{\text{kum}}$ als Faktor (vgl. Gleichung 5.41). Die Massen und die Beschleunigung der Antriebe der Maschine sind vom Hersteller als konstant angegeben und können vom Nutzer nicht beeinflusst werden. Zudem besteht kein Zusammenhang mit

der Aufspannorientierung, die der Werker jederzeit konfigurieren kann, sodass die ausmachenden Faktoren als ein sinnvolles Mittel zur Minimierung von P bzw. W herangezogen werden können.

Für die Umsetzung des Ansatzes hinsichtlich der Darstellung der kumulierten Verfahrswege sowie verringerten Achsverfahrswege ist der Ansatz als grafische Boundary-Box-Ansichten dargestellt, sodass dem Nutzer über eine Benutzerschnittstelle (s. Kapitel 6.1) unmittelbar ein Überblick ermöglicht wird. Eine Erkenntnis über die Auswirkungen, die die Orientierungsänderung der Aufspannung auf die Achsverfahrswege hat, lässt Rückschlüsse auf die Arbeitslasten für bestimmte Achsen zu. Für die Winkel $\theta = 150^\circ$, $\theta = 240^\circ$, $\theta = 330^\circ$ sind die dazugehörigen Boundary-Boxen in Abbildung 67 angeführt.

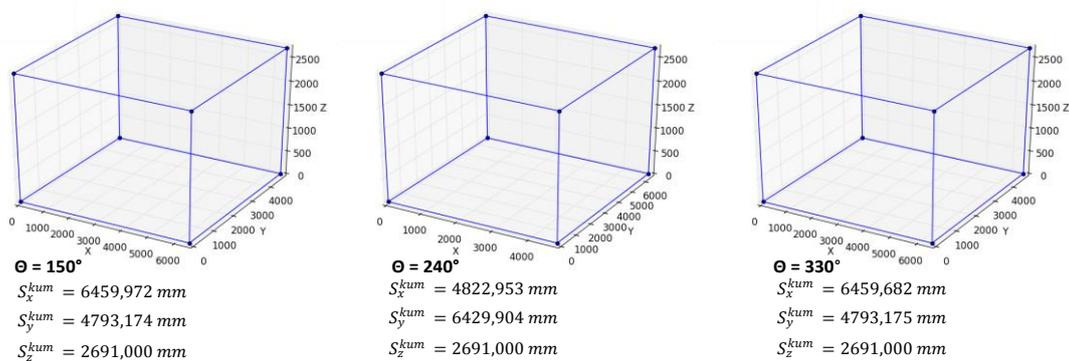


Abbildung 67: Kumulierte Verfahrswege je Maschinenachse als Boundary-Box-Übersicht für die Aufspannorientierung $\theta = 150^\circ$, $\theta = 240^\circ$, $\theta = 330^\circ$ aus der Benutzerschnittstelle

Die Boundary-Box-Diagramme für die Winkel $\theta = 90^\circ$ und $\theta = 270^\circ$, bei denen nur die Verfahrswege in x ein Minimum aufweisen, sowie für die Winkel $\theta = 0^\circ$ und $\theta = 180^\circ$, bei denen die y -Achse den minimalen Verfahrsweg aufweist, sind in Abbildung 68 dargestellt.

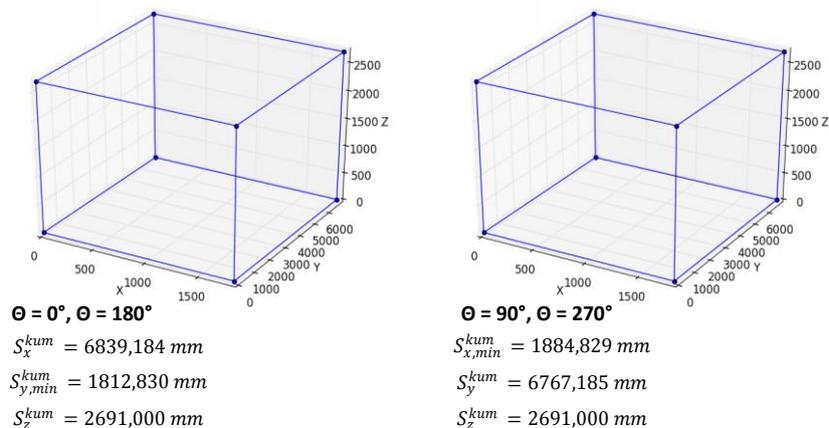


Abbildung 68: Kumulierte Verfahrswege als Boundary-Box-Übersicht für die Aufspannorientierung $\theta = 90^\circ$ und 270° , $\theta = 0^\circ$ und 180° für $S_{x,min}^{kum}$ und $S_{y,min}^{kum}$ aus der Benutzerschnittstelle

Die Winkelvariation ist für die Werkstückposition ausschlaggebend, wenn sich die Aufspannposition eines Werkstücks an dem Grenzverfahrweg zweier Maschinenachsen befindet und der Winkel so gewählt wird, dass bei den betreffenden Achsen²¹³ der Grenzverfahrweg nicht erreicht wird. Hierbei wird z. B. der Softwareendschalter durch die Steuerung ausgelöst, was durch das Aufspannverfahren I als eine invalide Aufspannposition bewertet wird. Diese Position, die zu einem Softwareendschalter führt, bleibt bei alleiniger Anwendung der vWZM unentdeckt, da das Maschinenmodell keine konkrete Rückmeldung gibt, sondern die Simulation anhält und nur einen Steuerungsfehler²¹⁴ meldet.

Ein Beispiel für die Relevanz eines vorteilhaft identifizierten Aufspannorientierungswinkels θ ist in dem Versuch Nr. 6 bei 8 Clustern in Tabelle 14 und in dem Versuch Nr. 6 bei 4 Clustern in Tabelle 16 identifiziert worden. Unter alleiniger translatorischer Koordinatenvariation mündet das Werkstück mit den zugehörigen Koordinaten für x und y in eine invalide Position, jedoch wird durch die Orientierung mit $\theta = 19,45^\circ$ und $\theta = -206,03^\circ$ die Werkstückposition als valide Aufspannlage identifiziert. Der steuerungseitige Softwareendschalter, der dabei ebenfalls aufgetreten ist, wurde ebenfalls vermieden.

Bei der Analyse des Werkstücks B, das in zwei Ebenen eine Symmetrie ausbildet und in der dritten eine asymmetrische Zielgeometrie beinhaltet, lässt sich eine $t_{ZN,min}$ von 453,037 s sowie eine maximale $t_{ZN,max}$ von 453,817 s messen, was eine Spannweite von 0,78 s ausmacht. Die $t_{ZN,min}$ wurde mit $\theta = 315^\circ$ erreicht ($t_{ZN,max}(\theta = 160^\circ)$). Die Initialaufspannorientierung $\theta = 0^\circ$ führt zu $t_{ZN} = 453,202$ s. Bei einer möglichen Initialaufspannung (als Vergleich), bei der $\theta = 90^\circ$ ist, würde $t_{ZN} = 453,614$ s ausmachen. Da hier auch keine translatorischen Verschiebungen stattfinden und damit der Werkzeugwechselweg nicht stark variieren kann, sind die Zeiteinsparungen mit 0,165 s ($\theta_{initial} = 0^\circ$) und 0,577 s ($\theta_{initial} = 90^\circ$) gering und können unter Abwägung des Aufspannaufwands für eine gedrehte Aufspannung nur marginale Vorteile einbringen. Eine Gesamtübersicht ist in dem Diagramm in Abbildung 69 dargestellt.

Unter Betrachtung der G-Befehle ist feststellbar, dass die Hauptzeitvariation auf den Eilgang G0 zurückzuführen ist, dieser allgemein jedoch einen geringen Anteil an der geschätzten Hauptzeit hat. Den größten Anteil auf die Hauptzeit hat die lineare Interpolation G1, bei der ein Vorschub vorgegeben werden kann. Unter Berücksichtigung der Werkzeugbeschaffenheit und des zu bearbeitenden Werkstoffs können diese Größen angepasst werden, um eine geringere Hauptzeit zu erreichen (z. B. Erhöhung des Vorschubs). Die genaue Vorschubkonfiguration wird hier nicht ermittelt, sondern es entsteht durch den entwickelten Ansatz nur ein Hinweis für mögliche Handlungsstrategien. Die Anteile G1,

²¹³ Häufig sind hiervon zwei gleichzeitig ansteuerbare Achsen betroffen.

²¹⁴ Der Steuerungsbefehl verweist auf einen fehlerhaften NC-Satz im NC-Programm, obwohl dieser als fehlerhaft angezeigte NC-Satz nicht die eigentliche Fehlerursache ist. Die vWZM verhält sich hier wie eine reale Maschine.

G2 und G3 bleiben über die Winkeleinstellung θ konstant. Tabelle 29 bietet hierzu eine Übersicht.

Tabelle 29: Randdaten der Aufspannorientierung bei $\theta \in [0;360^\circ[$ für Werkstück B

Max. Hauptzeit [s]	Min. Hauptzeit [s]	Max. Werkzeugwechselzeit [s]	Min. Werkzeugwechselzeit [s]
409,067	408,865	44,760	44,167
Max. G0 [s]	Min. G0 [s]	G1 [s]	G2 [s]
9,526	9,324	341,921	44,803
G3 [s]			
12,817			

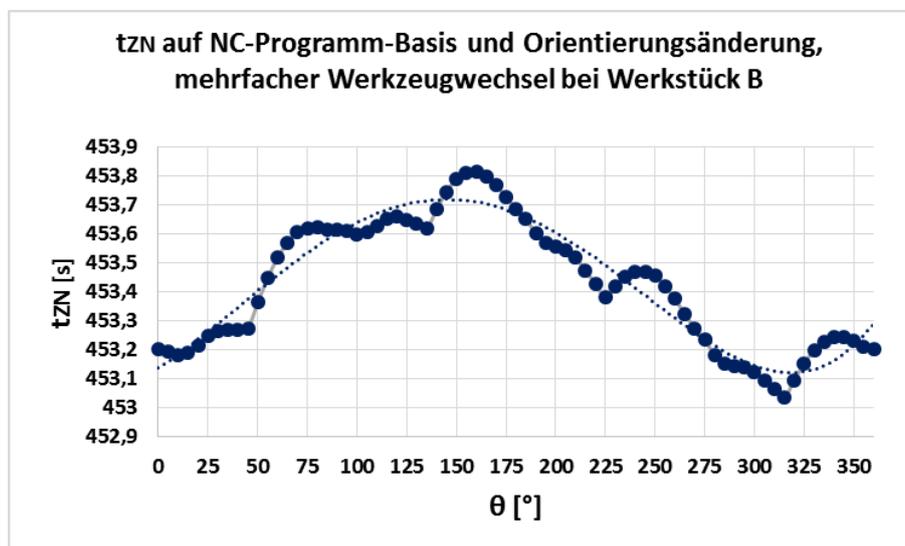


Abbildung 69: Kumulierte Verfahrlänge der Achse während der Fertigung mit der Aufspannorientierung von 0° bis 360° für Werkstück B

Unter Betrachtung der kumulierten Verfahrlänge während der Bauteilfertigung verhalten sich die Verfahrlängeanteile für die x - und y -Achse antizyklisch um 90° verschoben. Die Tabelle 30 zeigt die Beobachtungen für die minimierten Fahrwege und Fahrwegeanteile für x und y sowie die dazugehörigen Winkel θ . Die kumulierten Verfahrlänge für die z -Achse betragen konstant 1947,584 mm. $S_{gesamt,min}^{kum}$ der x -, y - und z -Achse macht 15712,68 mm aus und tritt für den Aufspannwinkel $\theta = 325^\circ$ auf. Die Zeit t_{ZN} ($\theta = 325^\circ$) = 435,154 s entspricht hier nicht dem Minimum (Abweichung zum Minimum sind 0,117 s). Der Winkel θ für $t_{ZN,min}$ und $S_{gesamt,min}^{kum}$ sind hier also nicht deckungsgleich ($\theta = 315^\circ$ führt zu $t_{ZN,min}$ und $\theta = 325^\circ$ führt zu $S_{gesamt,min}^{kum}$).

Tabelle 30: Einzelbetrachtung der Aufspannorientierung für die x-Achse und y-Achse

Aufspannorientierung θ	S_x^{kum}	S_y^{kum}
$\theta = 90^\circ, \theta = 270^\circ,$	$S_{x,min}^{kum} = 3583,058 \text{ mm}$	$S_y^{kum} = 7653,558 \text{ mm}$
$\theta = 0^\circ, \theta = 180^\circ,$	$S_x^{kum} = 7653,558 \text{ mm}$	$S_{y,min}^{kum} = 3583,058 \text{ mm}$

Die achsspezifischen kumulierten Verfahrswege für die Aufspannorientierung der x-, y- und z-Achse von $\theta = 0^\circ$ bis $\theta = 360^\circ$ sind in der Abbildung 70 dargestellt.

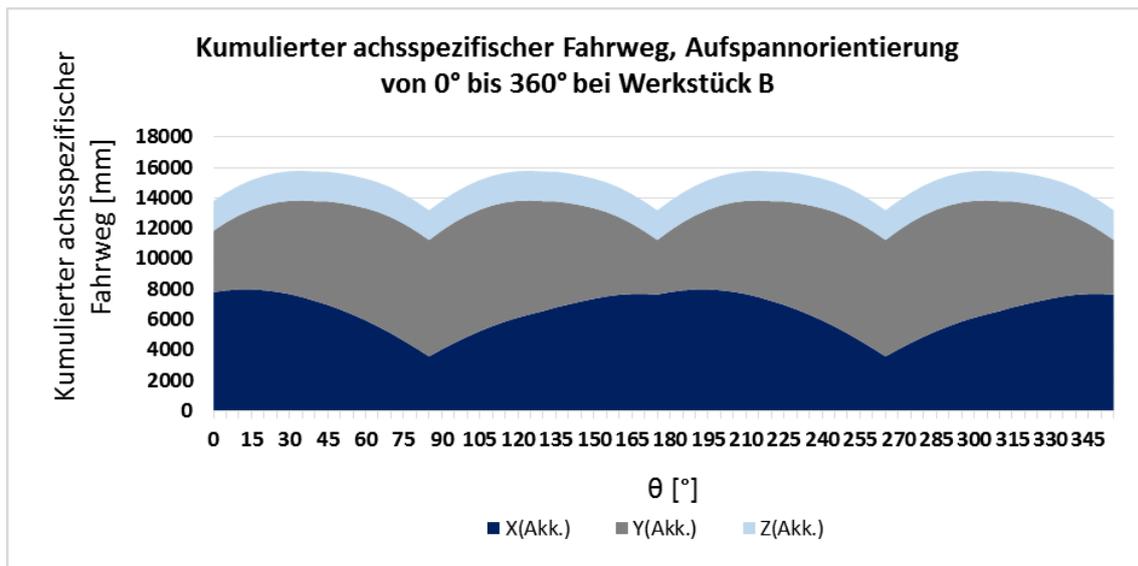


Abbildung 70: Kumulierte Verfahrswege der Achse während der Fertigung mit der Aufspannorientierung von 0° bis 360° für Werkzeug B

Die für $S_{gesamt,min}^{kum} = 15712,68 \text{ mm}$ zugehörige Darstellung als Boundary-Box-Diagramm für die Nutzerschnittstelle wird links in Abbildung 71 gezeigt. Die zweite Boundary-Box von links zeigt die Daten für die Aufspannung, die zu $t_{ZN,min}$ führt. Die rechten beiden Boundary-Boxen repräsentieren die Daten für $S_{x,min}^{kum}$ und $S_{y,min}^{kum}$.

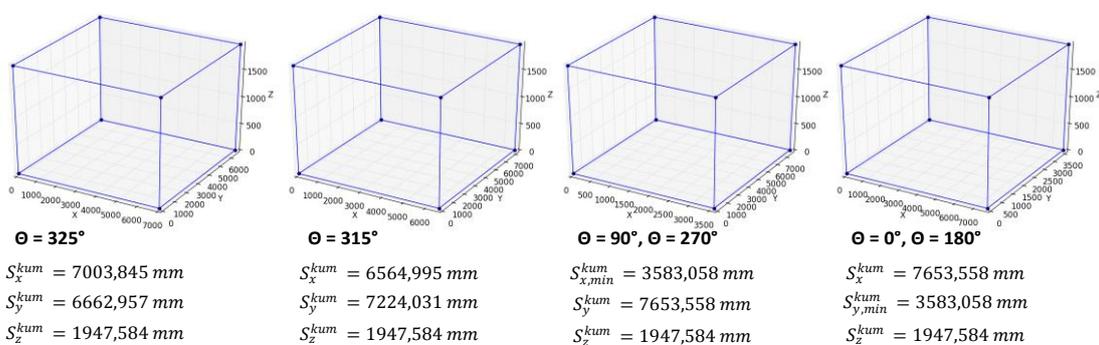


Abbildung 71: Boundary-Box-Diagramme für die Aufspannorientierung $\theta = 325^\circ$ für $S_{gesamt,min}^{kum}$, $\theta = 315^\circ$ für $t_{ZN,min}$, $\theta = 90^\circ$ und 270° für $S_{x,min}^{kum}$ sowie $\theta = 0^\circ$ und 180° für $S_{y,min}^{kum}$

Im Gegensatz zu Werkstück A ist der Aufspannwinkel, der zu $t_{ZN,min}$ ($\theta = 315^\circ$) führt, nicht deckend mit dem Aufspannwinkel, der zu $S_{gesamt,min}^{kum}$ ($\theta = 325^\circ$) führt. Das bedeutet, dass für die Ermittlung des Faktors für die Leistung P zunächst zwei Fälle vorliegen:

A) Der Geschwindigkeitsfaktor für $P_{t_{ZN,min}}$ beträgt für $\theta = 315^\circ$ mit $t_{ZN,min} = 435,037$ s und $S_{gesamt,min,(\theta=315^\circ)}^{kum} = 15718,33$ mm: $v_{P_{t_{ZN,min}}}^{res} = 36,13$ mm/s.

Der Geschwindigkeitsfaktor für $P_{S_{kum,min}}$ beträgt für $\theta = 325^\circ$ mit $t_{ZN} = 435,154$ s und $S_{gesamt,min}^{kum} = 15712,68$ mm: $v_{S_{gesamt,min}}^{res} = 36,108$ mm/s. Für die Arbeit $W_{S_{gesamt,min}^{kum}}$ beträgt der Faktor $15712,68$ mm und für $W_{t_{ZN,min}}$ $15718,33$ mm.

6.2.2.3 Werkstückpositionierung bei Initialkoordinaten außerhalb des Tischzentrums

Bislang wurde von initial vordefinierten Aufspannkoordinaten auf der Maschinentischenebene ($x; y$) mit $(0; 0)$ ausgegangen, die durch das Simulationsmodell standardisiert generiert werden. Im Gegensatz zur Standardkonfiguration sind hier Ergebnisse für eine Versuchsreihe mit dem Werkstück B präsentiert, die initiale Koordinaten für die Werkstückpositionierung von $(0; 250)$ aufweisen. Die Koordinate z bleibt dabei unberührt (d. h. $z = 0$). Die Zykluszeit t_{ZN} beträgt unter diesen Umständen $457,0$ s, was deutlich höher ist als t_{ZN} unter den Initialkoordinaten $(0; 0)$. Die Generationenzahl sowie Partikelanzahl verbleiben in der Standardkonfiguration (20 respektive 50).

Tabelle 31 zeigt die zugehörigen Ergebnisse auf. Die mittlere Zykluszeit beträgt hierbei $451,40$ s, was eine mittlere Differenz zu der Zykluszeit mit Initialkoordinaten von $5,81$ s ausmacht. Beim Vergleich dieser Ergebnisse mit z. B. Tabelle 13 ist ein bemerkenswerter Unterschied feststellbar. Die geringste Zykluszeit konnte mit $450,60$ s im Versuch Nr. 9 (vgl. Tabelle 31) identifiziert werden, was ebenfalls einem ähnlichen Niveau der Ergebnisse aus Tabelle 13 entspricht. Bei Betrachtung der Koordinaten ist feststellbar, dass die zykluszeitreduzierenden Zielkoordinaten ebenfalls in der Nachbarschaft der Werkzeugwechselkoordinaten auftreten. Somit ist tendenziell bestätigt, dass auch hier das Reduzierungspotenzial in der Verkürzung der Verfahrenwege bei Werkzeugwechselprozessen liegt. Die Abbildung 72 zeigt diesen Sachverhalt im Diagramm. Es wird ferner deutlich, dass die invaliden Aufspannkoordinaten unterhalb des Spindelwirkungsbereichs rechts vom Werkzeugwechsellpunkt liegen. Der Versuch Nr. 9 liegt als eine der wenigen validen Koordinaten ebenfalls rechts von der Werkzeugwechselkoordinate ($x > 228,97$ mm; ~ 250 mm).

Tabelle 31: Identifizierte Werkstückpositionierung der Versuchsreihen mit 4 Maschineninstanzen bei 2 Dimensionen, ausgehend von asymmetrischen Initialkoordinaten

Dimensionen: 2 Dimensionen (x, y); Abbruchkriterium: 20 Generationen; Schwarmgröße: 50 Partikel

Cluster/ Maschinen- instanzen	Versuchs- Nr.	x, betreffend X-Achse [mm]	y, betreffend Y-Achse [mm]	positionsabhängige Zykluszeit laut NC- Programm, tZN [s]	Validität der Position/Kollision/ Simulationsabbruch
4 Cluster	1	297,08	-36,31	451,11	nicht valide
		-29,40	-116,95	453,67	valide
	2	277,03	-66,85	450,92	nicht valide
		186,72	48,23	450,81	valide
	3	161,40	-53,19	450,84	valide
	4	181,46	16,23	450,76	valide
	5	192,47	-35,12	450,72	valide
	6	181,05	-72,81	450,88	valide
		268,66	80,35	451,23	nicht valide
	8	101,05	-54,29	451,58	valide
278,76		-57,73	450,89	nicht valide	
9	271,05	92,70	451,43	nicht valide	
	101,39	-36,87	451,58	valide	
10	244,87	8,29	450,60	valide	
	277,39	-46,16	450,85	nicht valide	
		43,64	-117,04	452,50	valide

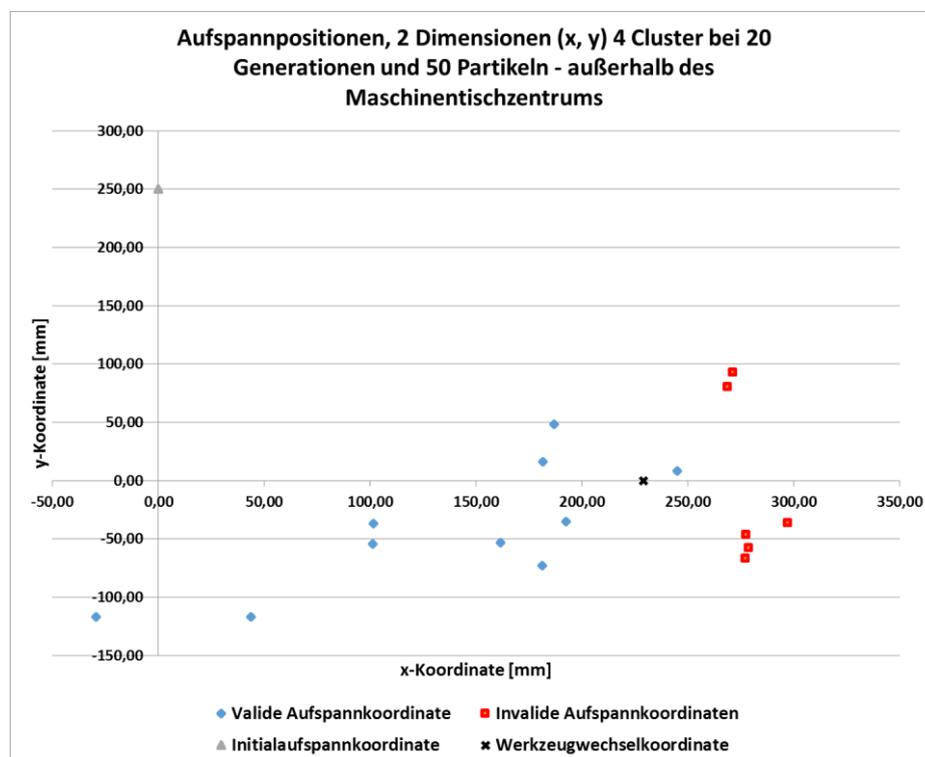


Abbildung 72: Übersicht der Positionskoordinaten für 4 Cluster und 2 Dimensionen unter Beachtung der Initialaufspannung außerhalb des Tischzentrums

6.2.2.4 Bewertung anhand der Gütekriterien für die Werkstückpositionierung

Gemäß der Konfiguration des Aufspannverfahrens I, bei dem in der Phase 1 die Metaheuristik PSO als Standardkonfiguration eine Schwarmgröße von 50 Partikeln aufweist und das Stoppkriterium nach 20 Generationen eintritt, stehen 4, 6 und 8 Cluster zur Verfügung, die Koordinaten für die Werkstückposition bereitstellen. Die entstandene Aufspannsituation kann exemplarisch hinsichtlich der Gütekriterien (vgl. 5.1.4) bewertet werden. Dazu wurden 10 Aufspannverfahren ausgeführt, die mit 10 Fertigungsaufträgen gleichgesetzt werden. Für die exemplarische Auswertung wird exemplarisch auf die Daten aus Tabelle 14 zurückgegriffen, die geeignete Testdaten beinhaltet.²¹⁵

Tabelle 32: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 1

Gütekriterium 1: Anzahl valider zykluszeitreduzierender Positionsparameter		
Cluster	Anzahl Parameter	Prüfintervall
4	9/10 valide Parameter	10 Verfahrensdurchläufe
6	5/10 valide Parameter, 5/10 invalide Parameter	10 Verfahrensdurchläufe
8	6/10 valide Parameter, 4/10 invalide Parameter	10 Verfahrensdurchläufe

Tabelle 33: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 2

Gütekriterium 2: Anzahl der Simulationsläufe (Kollisionsprüfungen)		
Cluster	Anzahl der notw. Simulationsdurchläufe	Prüfintervall
4	Bei Versuch-Nr. 2: 2	10 Verfahrensdurchläufe
	Bei Versuch-Nr. 3: 2	
6	Bei Versuch-Nr. 5: 4	10 Verfahrensdurchläufe
	Bei Versuch-Nr. 7: 2	
	Bei Versuch-Nr. 10: 2	
	Insgesamt: 18 Simulationsdurchläufe notwendig	
8	Bei Versuch-Nr. 1: 5	10 Verfahrensdurchläufe
	Bei Versuch-Nr. 2: 2	
	Bei Versuch-Nr. 4: 4	
	Bei Versuch-Nr. 7: 2	
	Bei Versuch-Nr. 10: 2	
	Insgesamt: 20 Simulationsläufe notwendig	

Tabelle 32 und Tabelle 33 zeigen, dass sich bei 10 Verfahrensdurchläufen für die jeweiligen Cluster-Konfigurationen ausreichend valide Positionsparameter identifizieren lassen. Dabei sind unter 4 Clustern die Anzahl der notwendigen Simulationsdurchläufe gering, wobei bei 6 und 8 Clustern mehr Zeit für die Validierungsläufe durch das Modell eingeplant werden sollte, was für Schwierigkeiten bei der Identifikation der validen Aufspannsituation spricht. Die validen Versuche sind nicht in den Tabellen gesondert aufgeführt, zählen aber zu der gesamten Anzahl der Simulationsläufe.

²¹⁵ Die Ergebnisse aus den weiteren Tabellen der Versuche sind gleichermaßen geeignet.

Tabelle 34: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 3

Gütekriterium 3: Anzahl der Cluster	
<i>Cluster</i>	<i>Anzahl Maschineninstanzen und potenzielle Koordinaten</i>
4, 6 u. 8	4, 6 und 8 Maschinen mit mindestens 4, 6 und 8 global-besten Koordinaten pro Cluster

Die Anzahl der Cluster (vgl. Tabelle 34) gibt an, wie viele potenzielle Lösungen für jeden Auftrag bereitstehen und wie viele Simulationsversuche potenziell notwendig sind, bevor das gesamte Aufspannverfahren verworfen wird und hierbei keine Verbesserung der Aufspannsituation möglich ist. In diesem Fall wird das NC-Programm mit der initialen Werkstückposition verwendet. Hier wurde die definierte Clustermenge erfolgreich generiert, was nicht unbedingt gegeben sein muss. Es kann durchaus vorkommen, dass die potenziellen Aufspannkoordinaten auf diese Weise angeordnet werden, sodass keine Cluster gebildet werden können (hohe Ähnlichkeiten der einzelnen Koordinaten, kein Abstand von den Centroids ermittelbar, etc.) bzw. von der definierten Clustermenge eine geringere Anzahl an Clustern generiert werden kann.

Tabelle 35: Exemplarische Auswertung bzgl. Gütekriterium 4

Gütekriterium 4: Veränderungen der NC-Sätze		
<i>Werkstück B</i>	<i>Art der Veränderung</i>	<i>Anzahl der zu ändernden NC-Sätze</i>
	Anpassung an translatorische Koordinatentransformationen	0
	Anpassung der rotatorische Koordinatentransformation	13 – Einfügen des Rotationsframes
	Anzahl steuerungsspezifischer Zyklen	0

Tabelle 35 zeigt, dass für das NC-Programm für Werkstück B nur Anpassungen der NC-Sätze in Form der rotatorischen Koordinatentransformation notwendig sind, um das Aufspannverfahren I erfolgreich anwenden zu können. Dies führt zu mindestens einer validen Lösung. Insgesamt sind 13 NC-Satz-Anpassungen pro Aufspannparameterausprägung notwendig. Es sind keine weiteren Zyklus-Anpassungen notwendig, sodass der Aufwand insgesamt als gering zu bewerten ist.

6.3 Reduzierung der Zykluszeit mittels Werkzeugpositionierung

Die Identifikation der Werkzeugpositionierung wird als Beitrag zur Reduktion der erweiterten Zykluszeit ebenfalls auf Basis realer NC-Programme und der gemessenen Prozesszeiten angewendet.

In Kapitel 5.2.8 ist dazu die Berücksichtigung einer definierten Standzeit einbezogen worden. Die Werkzeugbestückung wird nicht nur aufgrund der Nutzungsreihenfolge nach den bekannten NC-Programmbefehlen berücksichtigt, sondern es wird auch gewährleistet, dass Wartungsintervalle erfolgen können und damit die Einhaltung der Standzeiten gegeben ist. In der experimentellen Anwendung wird jedoch nur der Fokus auf die Reduzierung der Nebenzeiten gelegt, um den Nachweis zu erbringen, dass die Werkzeugbelegungsstrategie einen positiven Effekt auf die Zykluszeit hat, verglichen mit der zufälligen bzw. durch den Werker/Planer geplanten Werkzeugpositionierung auf Basis eines NC-

Programms. Die Standzeitüberprüfung findet vor der Werkzeugpositionierung und spätestens vor der realen Fertigung auf NC-Ebene statt, sodass die Werkzeuge, die die Standzeiten voraussichtlich erfüllen, in das Werkzeugmagazin positioniert werden.

6.3.1 Bestimmung der Werkzeugpositionen als Startbelegung

6.3.1.1 Eine reale Maschine als Modellgrundlage

Für die Umsetzung des in Kapitel 5.2 vorgestellten Ansatzes zur Positionierung der Werkzeuge im Werkzeugmagazin unter Berücksichtigung der Fertigungsaufträge und NC-Programme, insb. bei einer Aneinanderreihung verschiedener Aufträge²¹⁶ und NC-Programme, wird zu Demonstrationszwecken auf eine reale Werkzeugmaschine zurückgegriffen.

Die vWZM ist hierzu eingeschränkt nutzbar: Die Bestückung des Magazins in der Simulation der Werkzeugmaschine ist als sekundäre Funktion implementiert. Der Werkzeugwechsel als solches steht hierbei nicht im Fokus der Validierung des Fertigungsprozesses, sondern vielmehr die Kollisionsprüfung und die Materialabtragssimulation. Bei dem vorliegenden Simulationsmodell ist es zudem ohne zusätzliche Softwareapplikationen bzw. ohne hohen Verwaltungsaufwand möglich, die Werkzeuge in einem individuellen Werkzeugplatz zu positionieren.²¹⁷

Im Regelfall werden die Werkzeuge, ausgehend von der Session-Datei (VMDE), immer auf den Platz $n+1$ angeordnet, da in der Simulation sowie in der Steuerung keine Programmierung der Werkzeugplätze vorgenommen wird [DVM16-ol]. Im Rahmen der Simulation erfolgt die Bestückung per *Drag-and-Drop-Funktion* und kann unverändert beibehalten werden. Die Simulation würde auch nur erfolgreich verlaufen, wenn alle Werkzeuge sofort installiert sind und somit nur valide Werkzeugmagazinbestückungen automatisch gegeben sind. Fehlende Werkzeuge oder Beschädigungen und die daraus resultierenden Auswechslungen werden zudem nicht abgebildet.

Durch die Nutzung einer realen Maschine ist eine erhöhte Prozessgenauigkeit²¹⁸ bzgl. des Werkzeugwechselforgangs als großer Vorteil zu erwarten. Der Vorteil besteht z. B. darin, dass das Werkzeug individuell an beliebige Plätze montiert werden kann und zudem die Wechselzeiten beim Ein- und Ausbau erfassbar sind. Da reale Bewegungen und Interaktionen zwischen Mensch und Maschine stattfinden, sind diese physikalisch messbar.

²¹⁶ Ein Auftrag ist in der Regel in ein oder mehrere (n) Fertigungsschritte unterteilt, wobei hierzu auch ein oder mehrere, jedoch mindestens (n) NC-Programme vorliegen.

²¹⁷ Dies kann nur über die direkte Verarbeitung der VMDE erfolgen und ermöglicht detaillierte Informationen über die geometrischen Gegebenheiten der Werkzeuge, was in der praktischen Anwendung nicht durchgängig gewährleistet werden kann.

²¹⁸ Prozesszeiten können hierbei zeitlich erfasst werden, da der Mensch im Fokus steht und reale Rüsthandlungen vornimmt.

Zur Verbesserung der Arbeitsorganisation wird anhand der realen Maschine²¹⁹ ein Ersatzrechenmodell adäquat entwickelt.

6.3.1.2 Material und Werkstück

Das Fertigungsszenario bildet die Schlittenplatte (vgl. Kapitel 6.3.1.2) der Firma *Strothmann Machines and Handling GmbH*²²⁰ ab, die auch das NC-Programm für die angestrebte verbesserte Werkzeugmagazinbelegung anbietet. Das zugehörige 3D-Modell ist in Abbildung 73 dargestellt. Informationen über die verwendeten Softwarewerkzeuge und Solver sind im Anhang A2.2 vorzufinden.

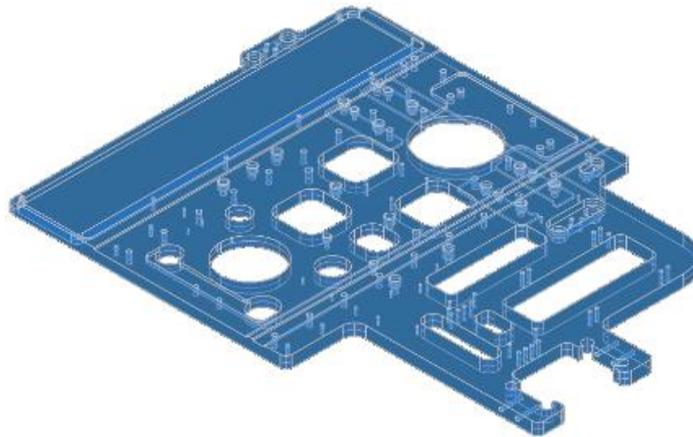


Abbildung 73: 3D-Modell der Schlittenplatte

6.3.2 Identifikation der Werkzeugpositionierung durch das MWZW

6.3.2.1 Ausführung anhand eines realen NC-Programms

Die Werkzeugpositionierung erfolgt anhand eines realen NC-Programms, und es werden drei Szenarien verglichen. Eine alternative Optimierung der Werkzeugpositionierung über das LP ist ferner gegeben. Zur Identifizierung der genutzten Werkzeuge für das zugrunde liegende Werkstück werden mittels NC-Parser-Applikation die T-Nummern aus dem NC-Programm ausgelesen und mit einem Reihenfolgeindex versehen. Die NC-Befehl-Reihenfolge der Werkzeugaufrufe, zugehörige T-Nummern und Werkzeugtechnologien sind dazu in Tabelle 46 in Anhang A2.3 aufgeführt und beziehen sich auf das Werkstück (vgl. Abbildung 73). Die Werkzeuge beinhalten die Technologien *Fräsen*, *Schruppen* und *Bohren*.

²¹⁹ *Emcomill E350* (vgl. 5.2.2 und technische Details in Anhang A2.4).

²²⁰ Die Firma *Strothmann Machines and Handling GmbH* war bis Juni 2016 Pilotprojektspartner für das Forschungsprojekt *InVorMa*. Im Rahmen der Arbeit wird die Firma abgekürzt als *Strothmann*.

Damit die Werkzeugpositionierung zu einem höher komplexen Szenario wird, sind fiktiv vier Werkzeuge mit einem höheren Magazinwerkzeugplatzbedarf versehen.²²¹ Die Standardgröße ist pro Werkzeug auf einen Speicherplatz im Magazin begrenzt. Somit handelt es sich um 33 Wechseloperationen bei insgesamt 26 verschiedenen Werkzeugen. Die Magazinkapazität beträgt hier $M_S = 20$. Die Lagerplatzeinheit außerhalb der Maschine wird mit einer unendlichen Kapazität angenommen.

Die Versuche umfassen drei Varianten zur Ermittlung der Startbelegung der Positionierung:

- A) *Zufällige Belegung des Magazins mit Werkzeugen als Initiallösung – Nutzung des MWZW zur Werkzeugpositionierung*
- B) *Greedy-Ansatz für die Werkzeugmagazinbelegung*
- C) *Planung der Werkzeugmagazinbelegung durch natürliche Personen*

Diese drei Ansätze werden mit der Optimierung verglichen. Der Initialzustand des Magazins ist im Leerzustand mit den Indizes pro Werkzeugplatz von 1 bis 20 durchnummeriert, und die Startposition des Scheibenmagazins sieht vor, dass der Index 1 an der Stelle des magazinseitigen Werkzeugwechsellpunkts liegt. Versuchsreihe A wurde mithilfe des GA (vgl. Pseudocode 4 in Anhang 2.5) und mithilfe der Software *MATLAB* durchgeführt.

6.3.2.2 Ergebnis des MWZW für die Werkzeugpositionierung

- A) *Zufällige Belegung des Magazins mit Werkzeugen als Initiallösung – Nutzung des MWZW zur Werkzeugpositionierung*

Nach 215 zufälligen Initialbelegungen (verursacht durch die Heuristik) werden in Tabelle 36 die Start-Werkzeugpositionierungen, die insgesamt zu den minimalen und maximalen Wechselzeiten (Fitness) führen, aufgezeigt. Die Wechselzeiten erfassen auch die Neubestückungsprozesse, sollten diese notwendig sein, und machen für die erweiterte Zykluszeit EZZ_{NC} den Wert für $t_{Werkzeug}$ aus. Eine Übersicht über die gesamten Konfigurationen sind dem Anhang A2.6 zu entnehmen. Die Zeit, in der alle auftretenden Wechseloperationen kumuliert ermittelt wurden, ist in Sekunden [s] angegeben. Die Bewertungsfunktion sowie die Zeiten sind in Kapitel 5.2.2.4 aufgeführt. Hier handelt es sich um valide Lösungen, d. h., es entstehen keine unnötigen Leerstände, und keine Werkzeuge werden doppelt einer Startbelegung (Initiallösung) zugewiesen.

Tabelle 36: Ermittelte Startbelegung der Werkzeuge als Zuordnung zu den Werkzeugmagazinplätzen durch MWZW

Fitness/Wechselzeit	205,42 s – Beste Zeit aufgetreten im 125. Durchlauf									
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern	72	68	4	19	35	67	20	7	59	10
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

²²¹ Drei Werkzeuge (T3, T150, T29) benötigen zwei Magazinplätze, ein Werkzeug (T200) benötigt drei Magazinplätze. Die verbleibenden Werkzeuge erfordern jeweils einen Magazinplatz.

Werkzeugnummern	15	150		169	6	2	22	149	5	93
Fitness/Wechselzeit	247,68 s – Höchste Zeit aufgetreten im 95. Durchlauf									
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern	72	68	4	19	35	2	20	7	200	
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Werkzeugnummern			150		18	3		149	5	93

Das Stopp-Kriterium (Konvergenzkriterium) als maximale Anzahl an Generationen beim GA ist 30. Die Magazinstartbelegung, die zu der besten Fitness führt, weist 205,42 s für die Wechsel- und Magazinkonfigurierzeit auf und tritt im 125. Berechnungsdurchlauf auf. Die höchste Wechselzeit, resultierend aus der Startbelegung, zeigt sich im 95. Durchlauf mit 247,68 s. Diese Magazinbelegung beinhaltet Werkzeuge als Startbelegung, die mehr als einen Magazinplatz benötigen, sodass einige Umordnungsvorgänge unumgänglich sind. Die durchschnittliche Fitness beträgt bei allen Generationen 218,431 s. Die Standardabweichung beträgt 7,316 s. Es sind keine hohen Ausreißer vorhanden.

B) Greedy-Ansatz für die Werkzeugmagazinbelegung

Die Anwendung des Greedy-Ansatzes besagt, dass jedes Werkzeug auf diese Weise eingepflegt wird, sodass es sukzessiv (nacheinander) durch das NC-Programm abgerufen wird und das Magazin inklusive Wechsellvorrichtung entsprechend den Wechsel durchführt. Dabei wird die Indexzuordnung aufsteigend mit aufsteigender Operationsreihenfolge und zugehöriger T-Nummer der Werkzeuge versehen. Die Tabelle 37 zeigt das resultierende Ergebnis.

Tabelle 37: Ermittelte Startbelegung der Werkzeuge unter Annahme der sukzessiven Zuordnung durch den Greedy-Ansatz

Fitness/Wechselzeit	340,365 s									
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern	15	169	93	22	200			29		23
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Werkzeugnummern	19	4	5	35	59	67	68	149	72	

Index 20 hätte das Werkzeug mit der T-Nummer 150 erhalten müssen, jedoch war die Kapazität des Magazins erschöpft, da T150 zwei Speicherplätze benötigt und somit nicht in die Startpositionierung zugeordnet werden konnte (vgl. Tabelle 46, Anhang A2.3).

C) Planung der Werkzeugmagazinbelegung durch natürliche Personen

Hierzu wurde das Belegungsproblem natürlichen Personen vorgelegt, die von Seiten der Qualifikation den Ingenieurwissenschaften oder der Maschinenbedienung zugeordnet sind. Es wurden bei der Erhebung $n = 67$ Rückläufer analysiert. Die Tabelle 38 zeigt dazu die Startpositionierung der Werkzeuge als Lösungen, die zu der minimalen Werkzeugwechselzeit (beste Fitness) sowie maximalen Werkzeugwechselzeit (schlechteste Fitness) führen. Im Gegensatz dazu konnte das MWZW mittels geringen Rechen- und Zeitaufwands 215 Positionierungslösungsvorschläge automatisch überprüfen.

Tabelle 38: Startbelegung der Werkzeugzuordnung zu den Magazinplätzen durch natürliche Personen

Fitness/Wechselzeit	231,73 s – Beste Zeit durch Werkzeugstartbelegung durch nat. Person									
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern	15	169	93	22	200			29		150
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Werkzeugnummern		4	5	3		6	10	20	35	59
Fitness/Wechselzeit	575,84 s – Längste Zeit durch Werkzeugstartbelegung durch nat. Person									
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern	15	169	93	22	23	19	4	2	35	59
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Werkzeugnummern	68	67	149	72	1	5	6	20	21	10

Die von den natürlichen Personen geplanten Startbelegungen von Werkzeugen zu den einzelnen Werkzeugmagazinplätzen weisen neben dem Greedy-Ansatz durchschnittlich die höchsten Zeiten auf. Das arithmetische Mittel aus den 67 Vorschlägen natürlicher Personen beträgt 336,607 s (Vergleich: Das arithmetische Mittel durch das MWZW der Versuchsreihe A beträgt 218,431 s), und die Standardabweichung liegt bei 89,646 s, was auf vermehrte Ausreißer hinweist. Das arithmetische Mittel aus den Personenvorschlägen liegt unter der ermittelten Zeit aus dem Greedy-Ansatz (340,356 s). Die Differenz zwischen der zeitgeringsten Lösung aus dem MWZW in der Versuchsreihe A und dem besten Ergebnis der natürlichen Personen (Versuchsreihe C) beträgt 26,05 s. Die maximale Werkzeugwechselzeit aus dem MWZW beträgt 247,68 s und wurde im 95. Durchlauf festgestellt und ist um 328,16 s niedriger als die maximale Zeit, ausgehend von einer gewählten Strategie durch eine natürliche Person. Die höchste Werkzeugwechselzeit aus dem MWZW ist nur ~ 16 s höher als die minimal erreichte Zeit ausgehend von dem Werkzeugpositionierungsvorschlag durch eine natürliche Person (231,73 s). Die Messungen ergeben, dass das MWZW hierbei das Potenzial besitzt, brauchbare und verlässlich bessere Lösungen zu generieren als bei der Werkzeugpositionierung durch eine natürliche Person (Planer oder Werker).

Die Abbildung 74 zeigt Wechselzeiten im Vergleich über die Anzahl der Planungsvorgänge auf Basis des NC-Programms durch Anwendung der Werkzeugstartbelegung mittels Greedy-Ansatz (rot), der Startbelegung mittels MWZW (blau) und die Startbelegung durch den menschlichen Einrichter (natürliche Person) (gelb) auf. Bei dem menschlichen Einrichter ist eine größere Streuung der Fitnesswerte identifizierbar, was auch auf die unterschiedlichen Erfahrungen der einzelnen natürlichen Personen zur Festlegung der Startbelegung zurückgeführt werden kann. Zudem ist diese Planungsaufgabe komplex, sodass es erschwert ist, ohne eine ausreichende Rechnerunterstützung einen Überblick über die Werkzeuge mit ihren Eigenschaften und die Operationsreihenfolge zu erhalten.

Das MWZW zur Werkzeugpositionierung weist über alle Generationen einen konstanten Trend auf und liegt überwiegend unter dem Bereich der Positionsvorschläge durch die natürlichen Personen.

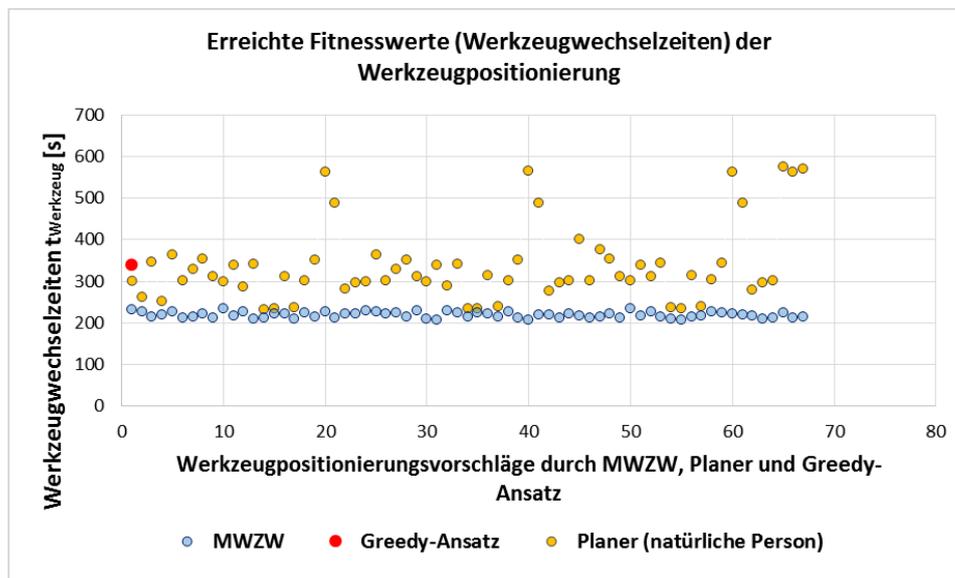


Abbildung 74: Vergleich der Fitnesswerte

Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse wird insgesamt gezeigt, dass die Werkzeugwechselzeit auf Basis der identifizierten Werkzeugpositionierung als Startbelegung, ausgehend von bekannten NC-Befehlen, unter Anwendung des MWZW gesenkt werden kann (im Vergleich zur Lösung durch eine natürliche Person). Die Größe $t_{Werkzeug}$ wird also reduziert und trägt dazu bei, dass EZZ_{NC} reduziert wird. Anhand des MWZW und einer Maschine mit einem „kleinen“ Werkzeugmagazin zeigt sich, dass dieser Ansatz auch für Werkzeugmagazine mit hoher Kapazität Potenzial bieten kann. Bei Magazinen mit einer hohen Anzahl an Plätzen würde eine Magazinbestückung zeitintensiv sein, und es ist frühzeitig erforderlich (vor Schicht- und Fertigungsbeginn), die Maschinenrüstung vorzunehmen, sodass hierzu ein Planungswerkzeug für die Werkzeugpositionierung hilfreich ist. Das gezeigte MWZW ist zwar mit der Maschine *EMCOMILL E350* (Vorbild) verknüpft, jedoch würden sich die menschlichen Arbeitsschritte bzgl. der Werkzeugentnahmen sowie des Einfügens in die Spindel bei einer alternativen Werkzeugmaschine ähnlich verhalten, sodass nur die Prozesszeiten angepasst werden müssen. Auch die Türbewegungszeiten sowie die Werkzeugwechselzeiten zwischen Wechselgreifer und Magazin sowie Rotationsschritt zwischen zwei Magazinplätzen sind in vergleichbarer Größenordnung, sodass dieses Modell ohne großen Aufwand auf alternative Maschinen adaptierbar ist. Dazu sei ein kleiner Vergleich zwischen den Maschinen *EMCOMILL E350*, *DMU 80 FD duoBlock* und *DMC 835 V* gezeigt (vgl. [EMCO17-ol], [DMC16-ol], [DMU16-ol]):

Tabelle 39: Maschinenvergleich für Werkzeugwechselprozesse

	<i>EMCOMILL E350</i>	<i>DMU 80 FD duoBlock</i>	<i>DMC 835 V²²²</i>
Magazinkapazität	20	40	20
Werkzeugwechselzeit	2,5 s	~0,5 s	1,6 s
Rotationszeit zwischen 2 Werkzeugplätzen²²³	~ 0,3 s	-	-
Span-zu-Span-Zeit	~ 5,25 s im Mittel (vgl. Anhang A2.1)	~4 s	7 s

6.3.3 Identifikation der Werkzeugpositionierung auf Basis eines linearen Optimierungsmodells

Die Berechnung für die Optimierung zu dem in Kapitel 5.2.7 eingeführten Modell wurde durch die in Anhang A1.4 beschriebene technische Ausrüstung durchgeführt. Die Werkzeugbezeichnung des Basis-NC-Programms ist identisch mit der aus Tabelle 46 in Anhang A2.3, und die Initialbelegung der Werkzeuge zu den Werkzeugplätzen ist zufällig generiert.

Das Fertigungsszenario der *Schlittenplatte (Strothmann)* erzeugt eine Lösung, bei der die Strategie notwendig ist, zunächst die ersten benötigten Werkzeuge zu positionieren, bis die Magazinkapazität erschöpft ist. Nach der damit verbundenen ersten Optimierung wird eine Neubelegung mit den verbleibenden Werkzeugen vorgenommen, die zuvor ebenfalls optimiert wurden. Dabei wird angenommen, dass alle Werkzeuge zuerst vollständig aus dem Magazin entnommen werden und im Anschluss die Neubelegung erfolgt. Dabei werden nur die Werkzeuge berücksichtigt, die für die verbleibenden NC-Befehle notwendig werden. Dabei kommt es zwangsläufig zu einer Unterbrechung der realen Fertigung, die aber ohnehin unvermeidbar ist, da die benötigten Werkzeuge die Anzahl der verfügbaren Magazinplätze übersteigt. Die Unterbrechung kann ggf. auch dafür genutzt werden, die Werkzeuge auszuwechseln, die die Standzeit beim nachfolgenden Durchlauf nicht einhalten würden. Dies wird allerdings separat und losgelöst von der Optimierung überprüft. Somit ergeben sich zwei Optimierungsdurchläufe mit zwei Belegungen, die nacheinander in die Fertigung eingeleitet werden: Das Ergebnis sind eine Startbelegung und wahlweise eine Folgebelegung, bei der die Werkzeuge im Magazin auf diese Weise angeordnet werden, sodass die Einzelverfahrenwege zwischen den Werkzeugwechseln minimiert werden

²²² Die Daten wurden bei der *DMG Mori AG* auf telefonischer Anfrage (Stand November 2016) bestätigt und sind ebenda dem Internetauftritt von der *DMG Mori AG* zu entnehmen.

²²³ Nach Anfrage bei der *DMG Mori AG* bzgl. der Wechselzeit zwischen zwei Magazinplätzen ist diese Zeit aufgrund der hohen Geschwindigkeit und Wechseldynamik nicht ohne hohen Aufwand messbar. Die erste Näherung kann erreicht werden, wenn eine vollständige Rotationszeit des Magazins durch die Anzahl der Magazinplätze dividiert wird. Dieses Vorgehen wurde nicht weiter verfolgt, da durch die Aussagen von der *DMG Mori AG* deutlich ist, dass die Wechselzeit insgesamt als niedrig einzustufen ist. Insgesamt sind hierzu also keine Angaben möglich.

(vgl. Modell in Kapitel 5.2.2). Dabei können hier die Lösungen in Form von Wechselschritten mit den gemessenen Zeiten (vgl. Tabelle 9 in Kapitel 5.2.2.4) multipliziert werden, sodass hier ebenfalls eine Zeitgröße entsteht, die eine Mess- und Vergleichbarkeit gewährleistet, und die Belegung bewertet werden kann. Tabelle 40 zeigt die ermittelten Lösungen der notwendigen zwei Belegungen zur Fertigung des Bauteils (vgl. Abbildung 73).

Tabelle 40: Lösung der Optimierung unter Nutzung des Solvers

Belegung	Anzahl Werkzeuge	Werkzeuganteil aus Werkzeuganzahl [%] / Magazinfüllstand [%]	Magazingröße	Laufzeit [s]
1/2	16/26	61,54 / 80	20	21701,1
2/2	12/26	46,15 / 60	20	2786,67
Belegung	Min. Zielfunktionswert	Objective Bounds	Knoten	Gap [%]
1/2	22	22.00000 - 21.00000	186745	4,55
2/2	40	40.00000 - 39.00000	89717	2,5

Die Magazinbelegung für die zwei erforderlichen Durchläufe wird in der nachfolgenden Tabelle 41 dargestellt. Die notwendigen Zeiten bzgl. der Arbeitsprozesse, wie z. B. Einbau-, Wechsel- sowie Rotationszeiten und die Öffnungs- und Schließprozesse der Maschinentür, wie sie in Kapitel 5.2.2.4 ermittelt wurden, können in das Modellergebnis einbezogen werden. Dabei sind die Rotationszeiten, die durch das Modell minimiert werden, die variable Größe, sodass für beide Belegungen kombiniert eine Gesamtzeit ermittelbar ist. Die Gesamtzeit beläuft sich im Mittel auf 196,83 s. Der Median liegt bei 195,75 s. Die mittlere Verbesserung verglichen mit der Belegung des MWZW (215 Durchführungen) liegt bei 21,601 s bzw. bei Vergleich des besten Ergebnisses des MWZW liegt die Differenz bei 8,59 s (vgl. Versuchsreihe aus Kapitel 6.3.2.2).

Tabelle 41: Gesamte Werkzeugwechselzeit $t_{Werkzeug}$ unter Verwendung des Zielfunktionswertes aus Gleichung 5.86 aus Kapitel 5.2.7

Fitness/Wechselzeit	Arithmetisches Mittel 196,83 s (Median 195,75 s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern, erste Belegung (1)	15		200			29		23	19	4
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Werkzeugnummern, erste Belegung (2)	5	35	59	67	68	149	172	22	93	169
Index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Werkzeugnummern, zweite Belegung (1)	150		18	1	2	59	7	35	21	
Index	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Werkzeugnummern, zweite Belegung (2)	3		20	6	10					

Jedoch sei festgehalten, dass sich die Berechnungszeit des zugrunde liegenden linearen Modells auf insgesamt 6,802 Stunden (24487,77 s) beläuft, während die 215 Experimente des MWZW (Rechenmodells) in wenigen Stunden (2,31 Stunden, entspricht 8316,00 s) durchgeführt wurden²²⁴. Ein Durchlauf benötigt hierbei wenige Sekunden und liefert dabei eine brauchbare Werkzeugstartbelegung, die zu einem geringen Zeitaufwand bzgl. der Arbeitsvorbereitungsprozesse führt und EZZ_{NC} reduziert.

Fazit zur Werkzeugpositionierung

Das MWZW zeigt eine schnellere Vorgehensweise zur Identifizierung einer Werkzeugstartbelegung im Rahmen der Werkzeugpositionierung als die manuell ermittelte Belegung des Werkers/Planers. Die Ergebnisse der Werkzeugbestückung des Werkers weisen insgesamt längere Dauern auf als die des MWZW, und dabei ist nicht die weitere Arbeitszeit (verursacht z. B. durch das Einpflegen der Daten, Identifikation der Aufträge und notwendigen Werkzeuge) berücksichtigt, die zur Identifizierung einer Werkzeugstartposition (Belegung) benötigt wird.

Die Modelle (MWZW und lineares Optimierungsmodell) können in Form einer Online-schnittstelle eingebunden werden, wodurch die Datenverarbeitung ohne geringen Aufwand und ohne hohe Fehleranfälligkeit durchführbar ist. Nachteile des MWZW sind zum einen der Rückgriff auf empirisch ermittelte Durchschnittswerte für einzelne Rüstprozesse und zum anderen die damit verbundenen unberücksichtigten Schwankungen der Einzelzeiten der einzelnen Arbeitsprozesse in der Realfertigung, die vom Mitarbeiter und den Standortgegebenheiten der Maschine abhängen.

Zudem besteht eine starke Bindung des MWZW an eine konkrete Maschine, da diese die Grundlage der ermittelten Arbeitszeiten abbildet, und es wird nur eine konkrete Startbelegung ausgegeben. Bei den verbleibenden Werkzeugbelegungen, die vorliegen, wenn das Magazin eine geringere Kapazität aufweist, als Werkzeuge benötigt werden (vorliegender Fall), wird davon ausgegangen, dass die Werkzeuge in der Reihenfolge der auftretenden Werkzeugnummern eingepflegt werden und die aus Distanzsicht nächstgelegenen entnommen werden, was insgesamt eine mittel- bis langfristige Planung erschwert.

Die verbleibenden Werkzeuge können aber ebenfalls durch den GA identifiziert werden, und eine Belegung kann erfolgen. Unabhängig von beiden Vorgehensweisen, werden alle Werkzeuge und zustande kommenden Wechsel- sowie Ein- und Ausbauprozesse in den Zeitrechnungen berücksichtigt. Für den Werker ist nur die Startbelegung wichtig, da damit ein Großteil des NC-Programms abgearbeitet wird. Bei Nachpflege des Magazins werden die Wechselprozesszeiten, basierend auf entnommenen und hinzugefügten Werkzeugen, summiert.

Das lineare Optimierungsmodell kann durch die einzelnen Variablen für umfangreiche Szenarien mit beliebiger Magazingröße und -konfiguration angewendet werden und erfordert für jeden Durchlauf eine konkrete Zuordnung der Werkzeuge zu den Plätzen.

²²⁴ Bei vergleichbarer technischer Infrastruktur.

Diese wird als Ergebnis zur Erreichung einer minimalen Rotationsschrittzahl ausgegeben. Dabei werden für jede Neubelegung alle Werkzeuge vollständig entnommen und in einer Neuordnung im Anschluss in das Magazin eingefügt. Damit liegt bei Übersteigen der Magazinkapazität durch die Werkzeugzahl mindestens eine oder auch mehrere vollständige Magazinneubelegung(en) vor, sodass keine weitere ungeplante Unterbrechung der Fertigung vorliegt. Unterbrechungen gefährden durch erneute Anfahrprozesse die einzuhaltenden Fertigungstoleranzen und sind weitestgehend zu vermeiden.

Für die Bewertung des realen Nutzens wird ein Vergleich zwischen dem benötigten Zeitaufwand zur Ermittlung eines Ergebnisses durch die Optimierung bzw. des MWZW und der Zeiteinsparung pro NC-Programm bzw. einer Reihe an NC-Programmen in der Fertigung vorgeschlagen, wenn die Neubelegung angewendet wird. Dabei müssen reale Arbeitszeiten hinzugezogen und die real verfügbare Rechnerarchitektur der Organisation könnte ebenfalls herangezogen werden. Bei dem LP ist unter Verwendung von handelsüblichen Arbeitsplatzrechnern eine hohe Berechnungszeit einzuplanen, sollte keine effizientere Rechnerarchitektur (z. B. Verteilung der Berechnung) zur Verfügung stehen, während durch das MWZW mit geringerem Zeitaufwand Ergebnisse identifiziert werden.

Bei einer vorliegenden Werkstattfertigung mit einer hohen Variantenvielfalt, z. B. bei Losgröße 1 (Unikat) o. Ä. ist der Ansatz einer langfristigen Werkzeugbelegungsplanung nicht mit höchster Priorität anzusehen.

6.3.4 Vorabüberprüfung des NC-Programms für eine standzeitadäquaten Werkzeugpositionierung

Die Vorabüberprüfung erfolgt durch die Subtraktion der Werkzeugeingriffszeit für jedes aus dem NC-Programm extrahiertes Werkzeug von der Reststandzeit der jeweils identifizierten Werkzeuge. Bei einer Unterschreitung der Standzeit wird das Werkzeug in einen Wartungszyklus versetzt, sodass dieses nicht erneut genutzt wird. Das NC-Programm wird dementsprechend angepasst, sodass ggf. die *T-Nummer* des ausgeschlossenen Werkzeugs durch die *T-Nummer* ersetzt wird, die einem Werkzeug zugehörig ist, das eine ausreichende Standzeit aufweist (Zwillingswerkzeug). Sollte die *T-Nummer* nicht verändert werden, so ist neben dem eigentlichen physikalischen Einbau des neuen Werkzeugs in das Werkzeugmagazin (Zwillingswerkzeug) eine Anpassung in der Maschinensteuerung vorzunehmen, um Fertigungsfehler zu vermeiden. Das Ablaufdiagramm in Abbildung 75 zeigt dazu einen möglichen schematischen Prozess.

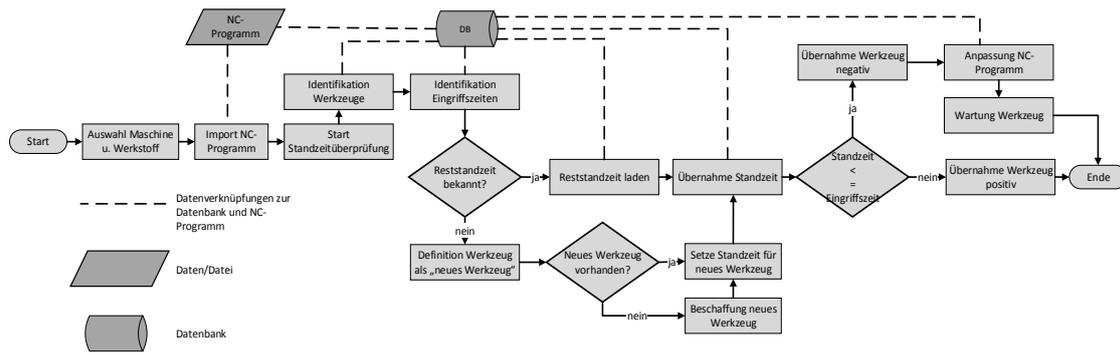


Abbildung 75: Schematischer Ablauf für die Standzeitvorabüberprüfung

Die Gestaltung der Benutzerschnittstelle könnte dazu eine Schnittstelle zur Datenbank ermöglichen, aus der das NC-Programm geladen und die Überprüfung mittels NC-Parser-Applikation durchgeführt wird. Die Bildschirmausgaben zeigen dabei die NC-Befehle an sowie die Reststandzeiten (aus der Datenhaltung), die Eingriffszeit (ermittelt aus dem NC-Programm) und Warnsignale anhand rot gefärbter Schrift. Zudem besteht die Möglichkeit, die Vorschübe und insb. die Schnittgeschwindigkeit (Parameterwahl) automatisch anzupassen, sodass ggf. die Standzeiten eingehalten werden (vgl. Kapitel 5.2.8, bspw. beim Fräsen über Gleichung 5.98). Diese Veränderungen haben u. a. einen Einfluss auf die Oberflächenqualität des Werkstücks (bei Veränderung von v_c , v_f und A) sowie auf die Fertigungszeit (bei Veränderung von v_f bzw. f). Ein Anwendungsbeispiel über die Benutzerschnittstelle ist (mit Bezug auf Abbildung 75) in Abbildung 76 gezeigt.

T_NUM	Standzeit (s)	Cutting Zeit (s)
9907	-457,27	678,64
9903	896,01	2,00
9905	813,86	43,07
9909	-892,72	896,36

Werkzeug T9907 und T9909 überschreitet deutlich die Standzeit - Handlungsbedarf. Wartung ist notwendig und ggf. Einbau eines Zwillingswerkzeugs.

Abbildung 76: GUI zur Überprüfung der Werkzeuge bzgl. Standzeitanforderung

7 Zusammenfassung

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Werkstück- und Werkzeugpositionierung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit drei Aspekten. Der erste Aspekt ist die Identifizierung von kollisionsfreien Werkstückpositionen und -ausrichtungen im Arbeitsraum einer Werkzeugmaschine, was zu einem zykluszeitreduzierenden Fertigungsprozess führt (Werkstückpositionierung). Dazu sind Aufspannverfahren (I und II²²⁵) entwickelt worden. Der zweite Aspekt ist die Werkzeugpositionierung der notwendigen Werkzeuge im Werkzeugmagazin unter der Ausgabe einer Startbelegung. Mithilfe der ausgegebenen Startbelegung ist der Werker in der Lage, die Werkzeuge auf diese Weise so an Werkzeugmaschinenplätzen anzuordnen, dass die Werkzeugmagazinrotationszeiten sowie Werkzeugwechselprozesse während der Fertigung reduziert werden. Dieser Effekt bringt ebenfalls eine reduzierte Zykluszeit mit sich. In die Werkzeugpositionierung ist zudem die Berücksichtigung der individuellen Werkzeugstandzeit integriert. Der dritte Aspekt ist im Rahmen der Umsetzung der zwei genannten Aspekte die Einbindung und Zusammenfügung der Verfahren zur Werkstück- und Werkzeugpositionierung in eine durchgängige Benutzerschnittstelle. Hierfür wurde eine GUI unter Zuhilfenahme eines Workflows zur Auftragsdefinition entwickelt. Ferner wurde der Versuch unternommen, die Benutzerschnittstelle anhand einer Kollaborationsplattform auszuweiten.

Die Basis für die Werkstückpositionierung bildet eine virtuelle Werkzeugmaschine aus der spanenden Fertigungstechnik, die ein etabliertes Simulationswerkzeug zur Validierung von NC-Programmen und generellen Fertigungsprozessen abbildet. Die Überprüfung von Werkstückpositionen beinhaltet ein Suchverfahren unter Einbezug der translatorischen Variation der Koordinaten in x , y sowie der Orientierung θ um die z -Achse in Bezug zu der Maschinentischoberfläche (Arbeitsraum), auf die das Werkstück aufgespannt wird. Dabei ist feststellbar, dass es für die translatorische Werkstückverschiebung in die x - und y -Koordinatenachsen sowie die Orientierungsänderung θ um die z -Achse endlich viele mögliche Lösungen gibt, diese jedoch nicht zeitnah manuell zu überprüfen sind. Aus akademischen Gesichtspunkten ist ferner die Betrachtung der translatorischen Verschiebung des Werkstücks in die z -Richtung denkbar.

In der praktischen Anwendung werden in der Regel die erstbesten identifizierten Koordinaten zur Aufspannposition des Werkstücks im Arbeitsraum der Maschine ausgewählt, die keine Kollisionen verursachen. Dadurch ist nicht gewährleistet, dass diese Werkstückposition eine Reduzierung der Zykluszeit mit sich bringt. Durch den Umstand der notwendigen Überprüfung einer hohen Anzahl an Koordinaten ist eine Metaheuristik – PSO – herangezogen worden, die Koordinaten als potenzielle Lösungen generiert. Die PSO ist

²²⁵ Vgl. Anhang A1.1 für Aufspannverfahren II

für die Zeitabschätzung mit einer gegebenen NC-Parser-Applikation als Fitness-Komponente kombiniert. Die NC-Parser-Applikation schätzt durch automatisches Einlesen der NC-Befehle die zykluszeitrelevanten Komponenten wie Werkzeugwechselforgänge, Hauptzeit und Nebenzeit auf Grundlage der zurückgelegten Werkzeugwege ab. Die Befehle werden hierzu aus einem realen NC-Programm extrahiert. Für die potenziellen Lösungen, die zu zykluszeitreduzierenden Werkstückkoordinaten führen, erfolgte noch keine Kollisionsprüfung. Die Kollisionsprüfung allein wird durch die virtuelle Werkzeugmaschine übernommen. Dabei können die einzelnen zu validierenden Koordinaten an Rechnerressourcen verteilt werden, sodass beschleunigt Lösungen gefunden werden können. Jede Rechnerressource beinhaltet eine Instanz der vWZM. Die Vorteile von verteilten Rechnerressourcen sind für zukünftige Anwendungen der Werkstückpositionierung weiterhin zu nutzen und ggf. auszubauen.

Der PSO-Algorithmus wurde für die Werkstückpositionierung um zwei Ansätze erweitert: In einem Fall werden die Partikel gruppiert (Teilasynchronität) und können nach jeder erfolgten Optimierung des Eingangsvektors (Koordinaten) direkt als einzelne Gruppe an die Evaluierungskomponente (hier NC-Parser-Applikation) übergeben werden. Dadurch kann im direkten Anschluss die nächste Optimierungsiteration gestartet werden, ohne dabei auf die verbleibenden noch nicht evaluierten Gruppen (Restschwarm) zu warten (*hier: Aufspannverfahren II*). Dieser Effekt ist vorteilhaft, wenn der Optimierungsprozess selbst, insb. die Fitnessbewertung, zeitintensiv ist. Da die NC-Parser-Applikation keine zeitintensive Berechnung beinhaltet, ist dieses Verfahren hier nicht zwingend notwendig. Ein zeitintensiver Validierungsprozess wäre z. B. gegeben, wenn die Koordinaten als Eingabevektor für die PSO direkt an die vWZM übergeben werden würden. Dieses Verfahren führt insgesamt zu einer hohen Anzahl von Simulationen und wäre nur rentabel, wenn eine hohe Anzahl an Simulationsmodellen (Instanzen) einer einzelnen Maschine zur Verfügung stünde. Einen ganzen Maschinenpark dabei zu simulieren würde die Rechnerressourcen²²⁶ enorm belasten.

Durch den Effekt der gegebenen NC-Parser-Applikation können in Sekundenbruchteile viele Ergebnisse bzgl. der Zykluszeit evaluiert werden, sodass der alternativ entwickelte Fall zielführend ist (*hier: Aufspannverfahren I*): Die PSO verläuft im Rahmen der Zykluszeitreduzierung synchron. Die identifizierten zeitminimalen Aufspannkoordinaten werden durch ein Clustering-Verfahren in Cluster aufgeteilt und die besten Repräsentanten der Cluster auf virtuelle Werkzeugmaschinen zur Kollisionsprüfung verteilt. Die Verteilung bzw. Parallelisierung der Koordinatenvalidierung bzgl. der kollisionsfreien Fertigung ist hierbei als sinnvoll einzustufen, wurde aber nicht weiter fokussiert, da die Parallelisierung nur eine lineare Skalierung mit sich brächte. Der Fokus liegt zunächst auf der erfolgreichen Identifizierung der gültigen Aufspannparameter.

Hierbei konnte mithilfe von Versuchen bei zwei und drei Dimensionen sowie variierender Cluster, Generationen und Anzahl der Partikel (Schwarmgröße) gezeigt werden, dass die

²²⁶ Bei einer bis wenige Rechnerinstanzen, die mit der Performance eines Standard-Desktop-PCs zu vergleichen sind.

identifizierten Koordinaten, die zu einer Werkstückpositionierung mit reduzierter Zykluszeit führen, in der Nachbarschaft der Koordinaten des Werkzeugwechsellpunkts der vWZM aufzufinden sind. Das Verfahren zeigt eine schnelle Konvergenz, und durch das Clustering-Verfahren und die damit verbundene Validierung der Werkstückpositionen sind deutlich weniger Simulationsläufe notwendig, sodass das Aufspannverfahren I generell als zielführend einzustufen ist. Für die Versuchsdurchführung wurden zwei Werkstückmodelle verwendet, denen unterschiedliche NC-Programme zugeordnet sind.

Die Mehrheit der identifizierten und validen Koordinaten führt unter Beachtung des kinematischen Aufbaus des Simulationsmodells zu einer Position, bei der das Werkstück beim Werkzeugwechselprozess nicht in das Arbeitsareal der Spindel nahe der Maschinenführung und Spindellagerung gelangt. Bei direkter Nähe zur Spindelführung und -lagerung wird bei der Fertigung (Werkzeugeingriff) oder dem Werkzeugwechsel ein invalider Parameter identifiziert. Konkrete Ergebnisse der Versuchsreihen sind dazu in Kapitel 6.2.2 aufgeführt. Die Reduktion der Zykluszeit zeigt über alle Experimente ein vergleichbares Niveau, wenn die einzelnen Ergebnisse der Experimente mit unterschiedlicher Generationen- und Partikelanzahl untereinander verglichen werden. Die höchste Reduzierung inklusive valider Position konnte bei zwei (x und y) und drei Dimensionen (x , y und θ) identifiziert werden (verglichen zu vier Dimensionen (x , y , z , θ) und drei Dimensionen (x , y , z ohne Berücksichtigung von θ).

Ferner konnte nachgewiesen werden, dass der größte Anteil der Zeitersparnis bei Variation der Werkstückpositionierung dadurch zustande kommt, dass der Werkzeugverfahrweg insb. bei Werkzeugwechselprozessen durch verbesserte Koordinaten eingespart werden konnte (vgl. Kapitel 6.2.2, Diagramme in Abbildung 63 und Abbildung 64).

Bei der Betrachtung der z -Koordinate (bei drei (x , y , z) bzw. vier (x , y , z , θ) Dimensionen) sind durch das Aufspannverfahren I häufiger invalide Ergebnisse identifiziert worden (vgl. Kapitel 6.2.2, Tabelle 25 und Tabelle 26): Dabei handelt es sich um identifizierte Parameter, die Spannmittel und Werkstück als physikalisch ungültige Position in das Arbeitstischmodell (vWZM) anordnen. Die Zeitersparnis beinhaltet jedoch ein vergleichbares Niveau wie bei den Versuchen mit drei (x , y , θ) bzw. zwei Dimensionen (x , y) ohne θ . Des Weiteren ist die Variation der z -Koordinate nur sinnvoll, wenn das Spannmittel ebenfalls der Höhe nach variiert werden kann. Eine außermittige Werkstückposition auf dem Maschinentisch als Initialzustand führt zu vergleichbaren Werkstückpositionskordinaten nahe dem Werkzeugwechsellpunkt (Kapitel 6.2.2.3).

Unter der reinen Betrachtung der Variation der Orientierung θ wird deutlich, dass bei den Haupt- und Nebenzeiten und damit bei der Zykluszeiten keine hohen Einsparungen zu erwarten sind, sodass hierzu deutlich eine translatorische Werkstückpositionierung, gepaart mit θ , notwendig ist. Jedoch kann die Variation von θ dazu beitragen, dass invalide Aufspannkoordinaten zu validen Aufspannkoordinaten führen, ohne dass eine translatorische Neu-Aufspannung notwendig ist, was vereinzelt ebenfalls in Kapitel 6.2.2 gezeigt wurde.

Für die zykluszeitreduzierende **Werkzeugpositionierung** wurde ein Modell auf Grundlage einer realen Werkzeugmaschine (und der damit verbundenen Prozesse zu Werkzeugpositionierung, -entnahme und -wechsel) entwickelt (MWZW). Als Optimierungskomponente dient der GA. Unter automatischen Abzähloperationen der einzelnen notwendigen Prozessschritte für den Werkzeugwechsel und -positionierungsprozess kann die identifizierte Startbelegung der Werkzeugpositionierung in eine messbare Größe umgewandelt werden. Die Basis dafür sind die Werkzeugwechselbefehle eines realen NC-Programms. Die Ergebnisse des MWZW werden mit einer erfragten Startbelegung, die von realen Personen zur Verfügung gestellt wurden, und mit einem Greedy-Ansatz verglichen. Daneben ist ein LP entwickelt worden, das ebenfalls die Werkzeugmagazinrotationsschritte minimiert und auf dieser Basis Startbelegungen für die Werkzeugpositionierung ausgibt. Dabei wird unterstellt, dass bei Magazinkapazitätsübersteigerung alle Werkzeuge entnommen werden und eine Neupositionierung erfolgt. Für die Versuche wird ein reales NC-Programm zugrunde gelegt, das eine hohe Anzahl an Werkzeugen und -wechseln benötigt und dessen erforderliche Werkzeuge die Magazinkapazität übersteigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch das MWZW in Kombination mit dem GA eine sinnvolle und zeitgünstige Startbelegung der Werkzeugpositionierung identifiziert werden kann. Verglichen mit dem Greedy-Ansatz sowie der Startbelegung einer natürlichen Person weist das Modellergebnis eine höhere Zeitersparnis für die Werkzeugwechselprozesse auf. Die Berechnung benötigt wenige Minuten und kann damit mehrmals sukzessiv hintereinander erfolgen, sodass eine hohe Ergebnisvariation generiert werden kann, die alternative Werkzeugpositionierungsstartbelegungen mit vergleichbarer Qualität bietet.

Das LP bietet, verglichen mit dem MWZW, die Lösung mit der geringsten Werkzeugwechselzeit (durch minimale Werkzeugmagazinrotationen) unter Anwendung der ermittelten Startbelegung. Jedoch erfordert das LP, verglichen mit dem MWZW, relativ hohe Rechenzeiten²²⁷. Tabelle 42 fasst die Ergebnisse übersichtlich zusammen:

Tabelle 42: Zusammenfassende Ergebnisse für die Werkzeugpositionierung

MWZW	MWZW	Greedy-Ansatz	Nat. Person,	Nat. Person,	LP
t_{min}	t_{max}	t	t_{min}	t_{max}	t
205,42 s	247,68 s	340,37 s	231,73 s	575,84 s	196,75 s

Die zugehörigen Werkzeugpositionierungen sind in nummerierter Form als Magazinplatzzuordnung den Kapiteln 6.3.2 und 6.3.3 zu entnehmen.

Die zu berücksichtigende Standzeit wird durch eine feste Definition (Herstellerangabe) vorgegeben, und es wird vorab mittels einer NC-Parser-Applikation überprüft, ob die Werkzeuge die definierte (Rest-)Standzeit einhalten. Dazu wurden eine Datenhaltung und eine Benutzeroberfläche (GUI) als Schnittstelle entwickelt, durch die der Nutzer die

²²⁷ Die Berechnungszeit ist zu einem gewissen Maß von der Rechnerinfrastruktur abhängig. Für den Vergleich zwischen LP und MWZW wurde eine vergleichbare Rechnerarchitektur verwendet.

Werkzeuge und Positionierung navigieren kann. Es werden nur diese Werkzeuge positioniert, bei denen die Werkzeugeingriffszeit die Reststandzeiten nicht übersteigt. Das lässt den Kritikpunkt zu, dass für jedes zu wartende Werkzeug ein Ersatzwerkzeug angeschafft werden muss. Des Weiteren müssen ggf. Wartungszyklen eingeplant werden, weil sich sonst alle notwendigen Werkzeuge nach einer bestimmten Verwendungszeit im Wartungsprozess befinden und die Fertigung wegen mangelnder Werkzeuge nicht oder nur unvollständig erfolgen kann. Die Vorabüberprüfung ist insgesamt notwendig, um zu vermeiden, dass während der Fertigung Fertigungsunterbrechungen und folglich Wiederanfahrprozesse der Maschine notwendig werden, die sehr zeitaufwendig sind.

Die beiden entwickelten Aspekte der Identifizierung von Werkstückpositionen im Arbeitsraum der Maschine und die Belegungsstrategie von Werkzeugen im Werkzeugmagazin werden durch eine durchgängige Schnittstellenlösung und durch eine Datenhaltung verwaltet. Die dafür entwickelte GUI ist an ein Netzwerk angebunden, an dem sich mehrere Nutzer anmelden können und eigene Fertigungsaufträge durch das Navigieren durch Reiter der GUI anlegen können. Dadurch werden auch die Werkstück- und die Werkzeugpositionierung eventbasiert angesteuert. Des Weiteren erfolgt der Nachweis, dass diese Lösungen auch unter Zuhilfenahme einer Kollaborations- und Kooperationsplattform, hier MSSP, zu bewerkstelligen sind. Dabei bleibt die Logik jeweils identisch, so dass sich nur die Programmierung bzw. die Visualisierungsstruktur und die Navigation ändern. Die Kollaborationsplattform erschwert allerdings die dynamische Nutzung der Werkstückpositionierung sowie die externe Ansteuerung des Simulationsmodells. Zwar können Anwendungen wie die NC-Parser-Applikation lokal mittels Kollaborationsplattform verwaltet und gestartet werden, jedoch ist dies kein echter Mehrwert. Die Auftragsdaten allein können jedoch gleichwertig verwaltet werden. Die vollständige Realisierung von MSSP in adäquater Umgebung wurde als Pilotanwendung, insb. auf Basis des Forschungsprojekts *InVorMa*, getestet. Es konnte aber keine vollständige Realisierung erfolgen, da *InVorMa* als Validierungsgrundlage eine Datenbank verwendet, die nicht automatisiert in das MSSP-System migrierbar ist und zusätzliche Programme benötigt. Aus dieser Randbedingung durch den Praxisfall folgt keine durchgängige Schnittstellenlösung für die Kollaborationsplattform. Insgesamt kann daher die Kollaborationsplattform hierzu nicht empfohlen werden. Die webbasierte GUI-Lösung als Benutzerschnittstelle ist wartungsfreundlich und erfordert keinen hohen Aufwand in der Bedienung und Einarbeitung. Externe Applikationen sind zudem ortsunabhängig ansteuerbar. Die GUI bietet zudem einen höheren Gestaltungsraum und ist nicht zwangsläufig an Lizenzverträge gebunden.

7.2 Grenzen der Arbeit

Für die „Optimierung“ und Koordinateninitialisierung im Rahmen der Werkstückpositionierung können weitere Metaheuristiken implementiert werden, um weitere Optimierungsaspekte der Maschineneinrichtung als Ganzes abzudecken. Das Clustering-Verfahren ist dahingehend zu erweitern, dass genauere Positionen und Werkstückorientierungen

berücksichtigt werden und auch die Verwendung verschiedenartiger Spannmittel berücksichtigt (simuliert) wird. Eine verbesserte oder alternative Spannmittelauswahl auf Grundlage von differenzierenden Werkstückhöhen (Variation der z -Koordinate) wird in der Arbeit nur bedingt behandelt. Die Betrachtung verschiedener Positionen auf der z -Achse (Werkstückhöhenlage) ist aus akademischer Sicht interessant und für eine Weiterentwicklung denkbar.

Des Weiteren ist es notwendig, auf eine „hohe Anzahl“ an Rechenressourcen zugreifen zu können. Dabei ist es ferner empfehlenswert, das Simulationswerkzeug (vWZM) in Form einer lokal installierten Simulationslösung, „schlanker“ zu gestalten. Zum Beispiel ist für die Überprüfung der Werkstückpositionierung hinsichtlich ungewollter Kollisionen eine visuelle Darstellung nicht zwangsläufig notwendig. Dadurch dass eine reale Steuerung verwendet wird, die alle Funktionen ausführt, ist die Simulation angehalten, diese auch zu bedienen: Dazu werden auch sicherheitstechnische Elemente wie z. B. eine geschlossene Arbeitsraumtür gefordert, ohne die die Simulation nicht gestartet werden kann. Dieser Umstand kann zu fehlerhaften bzw. einem Aussetzen der Validierungsläufe führen. Daher ist es erforderlich, dass diese zusätzlichen Funktionen, auch wenn diese in der Realität notwendig sind, für die Validierung ausgeschlossen (deaktiviert) werden könnten.²²⁸ Gegebenenfalls ist sogar nur der Simulationskern notwendig, um gezielte Ergebnisse ohne hohen Zeitaufwand zu erreichen. Dies wird besonders dann deutlich, wenn die Anzahl der zu überprüfenden Koordinaten durch zeitlich sehr umfangreiche Simulationsläufe auf einem Maschinenmodell oder sogar parallel auf mehreren Maschinenmodellen validiert werden soll. Bei paralleler Simulation muss ergänzend eine Lösung für eine Synchronisation des Materialabtrags gefunden werden, sodass die Kollisionsinformationen valide sind.

Die NC-Programme selbst werden um keine weiteren Informationen angereichert, sondern es werden auf deren Basis nur Zyklen an neue Orientierungen angepasst sowie Nullpunktverschiebungen vorgenommen. Eine weitere technologische Überprüfung bzw. automatische Veränderung findet nicht statt. Dazu wäre eine informationstechnisch weiterzuverarbeitende Ausgabe von Seiten der Simulation sinnvoll, was aktuell noch nicht geboten wird. Zur geometrischen Überprüfung reicht der geschaffene Ansatz aus, jedoch kann ohne die Visualisierung keine feingranulare Koordinatenabschätzung stattfinden, ohne dass der Rechenaufwand ansteigt.

Die Umsetzung einer asynchronen Werkstückpositionierung nach dem Aufspannverfahren II (vgl. Anhang A1.1) ist noch nicht vollständig realisiert. Dafür wäre es auch von Vorteil, wenn das Simulationsmodell (die Berechnung) parallelisierbar wäre. Dieser Umstand ist jedoch für die Vorausberechnung der Zielgeometrien problematisch, da nacheinander erfolgende Fertigungsoperationen parallel erfolgen und berechnet werden müssen, ohne sich gegenseitig zu behindern. Somit ist zunächst auch kein sinnvolles Ergebnis bei der Materialabtragsberechnung zu erwarten (Synchronisation). Auch wird die Verteilung

²²⁸ Dieser Aspekt hängt mit der Art der vWZM und den herstellerepezifischen Lösungen zusammen, die als Softwarewerkzeug entwickelt wurden.

der Simulationsaufträge zur Validierung der Werkstückpositionen an eine hohe Anzahl an Rechnerressourcen nicht durchgeführt, die ggf. außerhalb der Versuchsumgebung erreichbar sind. Des Weiteren sind Szenarien, in denen (reale) Rechnerknoten ausfallen, noch nicht erprobt. Die Verteilung findet bislang an sichere und allgemein verfügbare Maschineninstanzen statt, die in Form eines *Demonstrator-Cloud-Netzwerkes* für Testzwecke bestehen.

Bei der zykluszeitreduzierenden Werkzeugpositionierung erfolgt aktuell noch keine detaillierte Einbeziehung der Standzeiten sowie deren exakte Berechnung für die einzelnen Werkzeuge. Es findet lediglich eine Vorabüberprüfung der Standzeit statt. Es ist für ein standzeitgerechtes Fertigen denkbar, Arbeitsbereiche zu errechnen, wobei auch hierdurch Schwankungen entstehen und durch Manipulation des NC-Programms, insb. bei Veränderungen von Vorschub und Drehzahl, die Fertigungszeit und Bauteilqualität negativ beeinflusst werden können.

Des Weiteren ist die Basis für die zykluszeitreduzierende Bestückungsstrategie ein MWZW, was an einer realen Maschine angelehnt ist. Das bedeutet, dass die einzelnen Prozesse exakt mit einer Maschine kompatibel sind, was aber dazu führt, dass das MWZW für jede abweichende (individuelle) Maschine angepasst werden muss. Wenn die Modelle einmal definiert sind, kann auf komplexe mathematische Modelle verzichtet werden. Die Ergebnisse beziehen sich nur auf die Werkzeugwechselzeiten inklusive Magazinrotationszeiten und geben dem Nutzer eine Startbelegung aus, die sich jedoch auf ein zugrunde liegendes NC-Programm bezieht, wozu die exakte NC-Programmreihenfolge zwangsläufig bekannt sein muss. Zudem ist es empfehlenswert, dass die zugrundeliegenden NC-Programme kompatibel mit der Werkzeugmaschine (Basismodell) sind.

7.3 Weiterer Forschungsbedarf

Es wurden durch die Werkstückpositionierung Daten generiert, die die Zykluszeit und dazugehörige Koordinatenwerte für x , y , z und θ angeben sowie die Information, ob diese Koordinaten eine valide Aufspannung bieten oder zu Kollisionen führen. Mithilfe dieser Informationen könnte es bedeutsam sein, einen *Machine-Learning-Ansatz* zu verfolgen. Hierzu kann ein Trainingsdatensatz auf Basis von Koordinaten, die durch die Simulation erstellt und überprüft wurden, generiert werden, um zukünftige Koordinaten der Werkstückpositionierung zu prüfen, ohne dabei auf zusätzliche aufwendige Simulationsläufe zurückzugreifen. Eventuell sollte als Vorgriff eine Klassifizierung der Daten mittels *Support-Vektor-Maschine* oder *kNN-Neighborhood-Search* erfolgen. Dabei kann das Datenmodell mit anderen Informationen wie geometrische Bauteilgrößen und Formen ergänzt werden, damit verlässliche Lösungen generiert werden. Ferner könnte auch eine Lösung entwickelt werden, die auf Basis der Trainingsdaten sowie der zukünftigen Eingangsdaten einen Softwareendschalter in die SPS (PLC) einfügt, der die Kollision durch das Verhindern ungültiger Achsverfahrenbereiche und -positionen vorab abwehrt.

Für die Werkzeugpositionierung könnte zudem ein Lösungsverfahren durch Methoden aus der Online-Optimierung angestrebt werden. Als erster Vorschlag ist es zu prüfen, ob hierzu ein Organisieren von linearen Listen zielführend ist. Dabei wäre aber zu berücksichtigen, dass die Reihenfolge der einzuwechselnden Werkzeuge durch das NC-Programm bekannt ist – eine eventuelle Anpassung der Annahmen wäre hier notwendig.

Für die Werkzeugpositionierung wäre ferner eine verbesserte Standzeitabschätzung denkbar, die mithilfe von Optimierungsmodellen berücksichtigt wird. Die Standzeiten hängen dabei von jedem Werkzeugeingriff ab, sodass die damit zu modellierende Standzeitrestriktion sich mit fortschreitendem NC-Satz (insb. Werkzeugwechsel) dynamisch verhält.

Für weitere Forschungsarbeiten ist ein erweiterter Zusammenhang zwischen der Werkzeug-Geraden und Maschinen-Geraden als gedankliches Modell interessant. Anzustreben wäre hierzu eine standzeitoptimale Schnittparameterkombination. Dabei ist aus gedanklicher Sicht das Überlagern der beiden Geraden anzustreben, was in Abbildung 77 angedeutet ist. Dadurch wäre erreicht, dass jede Parameterkombination für v_c und A optimal ist bzw. keine Überlastung von Werkzeug und Maschine möglich ist.

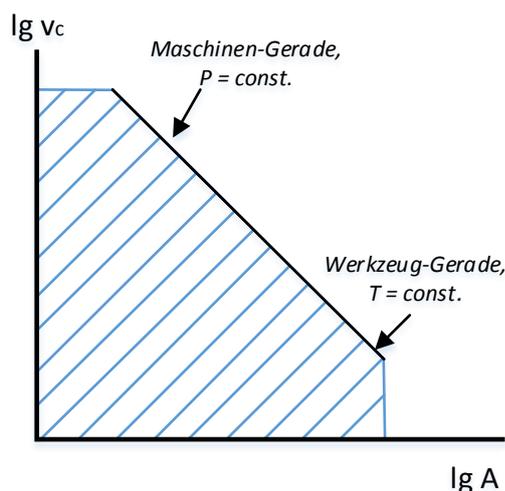


Abbildung 77: Überlagernde Werkzeug- und Maschinengerade

Die zentrale Frage bzgl. der Abbildung 77 adressiert die konkreten Auswirkungen der gleichläufig überlagernden Werkzeug- und Maschinen-Geraden auf die Gestaltung (insb. Dimensionierung) von Werkzeugen. Ferner ist zu ermitteln, ob jede Werkzeugmaschine individuell zugeschnittene Werkzeuge enthält oder ob Lösungen möglich sind, sodass jedes Fräswerkzeug mit jeder Werkzeugmaschine kompatibel gestaltet ist.

Für die verbesserte Nutzung von Kollaborationsplattformen sind weitere Forschungsschwerpunkte im Rahmen der Integration der Werkstück- und Werkzeugpositionierung vorzunehmen. Zudem sollte ein Datenformat angestrebt werden, was sich auch mit Sys-

temen und Applikationen verwandter Bereiche aus der betrieblichen Fertigung kombinieren lässt. Auch eine durchgängige externe Ansteuerung der einzelnen Werkzeuge und Applikationen sowie der vWZM²²⁹ wäre hier sinnvoll.

²²⁹ Eine externe Ansteuerung des vWZMs existiert bereits.

Anhang

A1	Ergänzungen zur Werkstückpositionierung	237
A1.1	Optimierungsansatz durch unterschiedliche Konfiguration der Asynchronität des PSO-Algorithmus.....	237
A1.2	Konvergenzverhalten der ersten Stufe des Aufspannverfahrens I.....	242
A1.3	Konfidenzanalyse der Metaheuristik	243
A1.4	Programmierwerkzeuge und Rechnereinrichtung	245
A1.5	Pseudocode der PSO und K-Means-Algorithmus	246
A1.6	Ergänzung zum Datenbankmodell für die Werkstückpositionierung	246
A1.7	Schnittstelle auf XML-Basis	248
A1.8	Ergänzungen zur Kreisinterpolation bei Kreisendpunkt Kreisradius	249
A2	Ergänzung zur Werkzeugpositionierung	255
A2.1	Messung und Versuchsdurchführung auf Basis der Span-zu-Span-Zeit 255	
A2.2	Softwarewerkzeuge	256
A2.3	Reihenfolge der Werkzeuge aus dem NC-Programm <i>Schlittenplatte</i> ..	258
A2.4	Technische Daten der realen Maschine.....	259
A2.5	Pseudocode Genetischer Algorithmus.....	262
A2.6	Startbelegungen der Werkzeugpositionierung	262
A3	Nachtrag und Ergänzung zur Onlineschnittstelle	267
A3.1	Kollaborations- und Kooperationssysteme.....	267
A3.2	Kollaboration und Einordnung von MSSP.....	268
A3.3	Exkurs.....	271

A1 Ergänzungen zur Werkstückpositionierung

A1.1 Optimierungsansatz durch unterschiedliche Konfiguration der Asynchronität des PSO-Algorithmus

Der Ansatz unter verschiedener Konfiguration der Asynchronität wird zur Vollständigkeit aufgenommen und theoretisch getestet. Im Rahmen der Arbeit wird der Ansatz jedoch nicht in Form einer realen Anwendung implementiert, da sich durch die schnelle Ergebnisevaluation mithilfe der NC-Parser-Applikation kein Bedarf ergibt, weitere beschleunigende Maßnahmen zu ergreifen. Jedoch wurden in Kapitel 2.1.2 die mögliche Verteilung und Ausnutzung nicht vollständig genutzter Computerressourcen angedeutet, sodass dieser Ansatz weiterhin relevant, insbesondere nach dem Vorbild von [Set16-ol], für Anwendungen innerhalb einer Organisation ist.

Die Abbildung 78 verdeutlicht die Fallunterscheidung der *teil-asynchronen* PSO-Erweiterung sowie die *synchrone* PSO. Die Optimierungsläufe sind in Rot gekennzeichnet, und die Evaluation durch die Fittesseinheit (Simulationsmodell oder NC-Parser-Applikation) ist in Grün eingefärbt. Die Balken sind auf einer Zeitachse aufgetragen und symbolisieren die Laufzeit. Im oberen Teil der grafischen Darstellung sind die (neun) Partikel in drei Gruppen A, B und C aufgeteilt, die wiederum innerhalb der Gruppe synchron optimiert und evaluiert werden, jedoch außerhalb der Gruppensicht (Gruppenebene) *asynchron*. Der untere Teil als *synchrone* PSO zeigt den Ablauf, der als eine gesamte (große) Gruppe angesehen werden kann. $t_{O,A}$, $t_{O,B}$, $t_{O,C}$ deuten die Zeitpunkte an, an denen die Optimierungsläufe der Partikel der jeweiligen Gruppe A, B oder C abgeschlossen sind und für die Evaluation (vWZM) freigegeben werden. Hierbei wird verdeutlicht, dass im *teil-asynchronen* Fall die laufzeitminimalen Partikel unmittelbar an die nächste freie Ressource vergeben werden können. Im *synchronen* Fall muss gezwungenermaßen immer die Dauer der Optimierung aller Partikel abgewartet werden, bevor die eigentliche Evaluierung per Fitnesskomponente (Simulation oder NC-Parser-Applikation) erfolgen kann, die an die jeweilige Computerressource vergeben wird. Im unteren Teil der Abbildung 78 stellen t_0 und t_5 die Endzeitpunkte dar, an denen die Iteration der Partikeloptimierung und die anschließende Evaluierung der Partikel der *synchronen* PSO durch die Fitnesskomponente abgeschlossen sind.

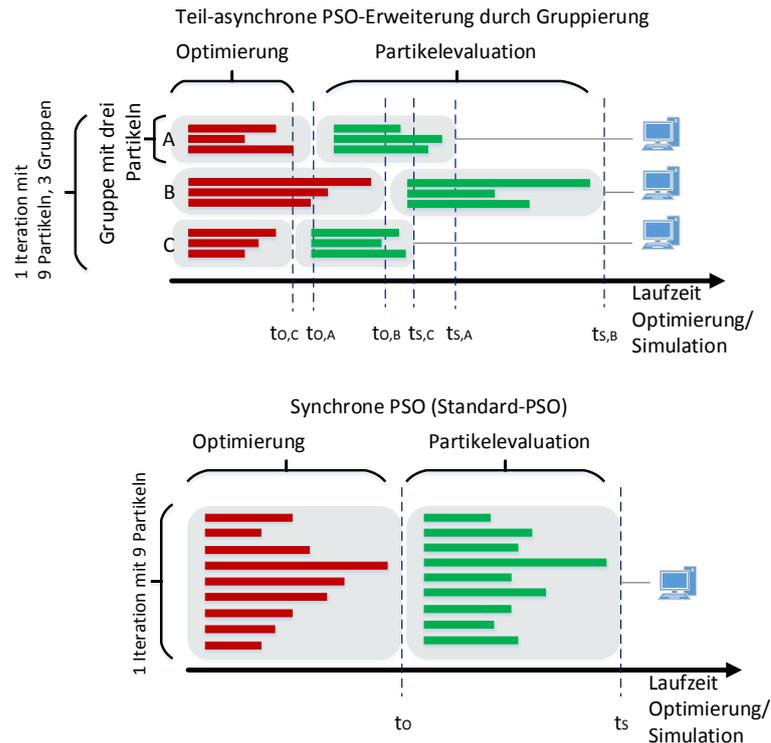


Abbildung 78: Schematische Darstellung der PSO-Algorithmus-Erweiterung für Aufspannverfahren II

Herstellung der Teil-Asynchronität und Gruppierung der Partikel

Um die Lösungskandidaten aus den einzelnen Partikeln gleichmäßig auf eine bestimmte Anzahl an Gruppen zu verteilen, damit auf Gruppenebene eine *asynchrone* Partikelevaluation erfolgt, sei hierzu als Population der Partikel $P_{\text{Partikel}} = [1, \dots, i]$ sowie $G_{\text{Partikel}} = [1, \dots, j]$ als $j \leq i$ große Gruppen gegeben. Die Population bzw. die zugehörigen Partikel werden über die Funktion $f: P \rightarrow G$ auf die Gruppen verteilt, wobei $g \in G$ und $g = \left\lceil p * \frac{j}{i} \right\rceil$ ist. Der (vollständig) *asynchrone* Fall liegt vor, wenn $i = j$ gilt, und der (vollständig) *synchrone* Fall wenn $j = 1$ ist. Der Nachweis bzgl. des Konvergenzverhaltens sowie die Funktionalität, dass Computerausfälle und Verteilung auf mehrere Computereinheiten durch die *asynchrone* Evaluation möglich sind, werden in Reisch et al. (vgl. [RWL+15]) gezeigt. Der Grad der *Asynchronität* ist über die Partikelanzahl pro Gruppe und die Gruppenanzahl zu bestimmen.

Die Gruppe der zu evaluierenden Partikel, ausgehend von der *synchrone* Optimierung, kann auch *asynchron* auf verschiedene Rechnerressourcen (installierte Simulationsmodelle) verteilt werden. Dabei ist zu beachten, dass unmittelbar im Anschluss an die Partikeloptimierung die Evaluation auf freie Rechnerressourcen erfolgt, damit das Potenzial bei der *Asynchronität* ausgenutzt werden kann und mögliche Wartezeiten vermieden werden, die durch die verbleibenden Partikel in anderen Gruppen, die noch zur Evaluation ausstehen, entstehen. In Abbildung 78 liegt dieser beschriebene Fall vor, wenn die Grup-

pen A und B mit der Gruppe C verglichen werden. Die Verteilung auf mögliche Rechnerressourcen kann je nach Verfügbarkeit und Ressourcenknappheit mithilfe eines *Scheduling-Verfahrens* (Reihenfolge und Ressourcenzuordnung) erfolgen. Durch dieses Verfahren wird prinzipiell an dieser Stelle eine Priorisierung bzw. Evaluationsauftragsreihenfolge getroffen, wenn bestimmte Optimierungsläufe nicht dringend (per sofort) zu evaluieren sind. Als Standardfall in diesem Rahmen ist die Reihenfolge nach dem „FIFO²³⁰-Prinzip“ festgelegt. Allgemein richten sich die Reihenfolge der zu optimierenden Aufspannsituationen der Werkstücke sowie die damit verbundenen Simulationsläufe in erster Linie nach der Anordnung der (geplanten) Produktionsaufträge. Das heißt, dass die Werkstücke, die dringend gefertigt werden müssen, eine priorisierte Überprüfung der Aufspannsituationen durchlaufen, um in der Gesamtbetrachtung nicht unnötige Schäden, Produktionsausfälle sowie Verzögerungen zu bewirken. Ein dafür vorgesehenes *Scheduling-Verfahren*²³¹ wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Der Ansatz zur Verbesserung der Performance der einzelnen Optimierungsläufe kann mit der *teil-asynchronen* PSO-Erweiterung verfolgt werden, wobei dazu Folgendes zu beachten ist: Bei Anwendung der *asynchronen* PSO wird impliziert, dass nach jedem Optimierungslauf die Evaluierung der Partikel angestoßen wird, auch wenn dies bedeuten würde, dass nicht alle Partikel(positionen) vollständig nach den Gleichungen 5.9 und 5.10 (vgl. Kapitel 5.1.2.1) aktualisiert werden. Um die nächste Iteration starten zu können, basiert die Aktualisierung der Partikelpositionen und der „Geschwindigkeit“ des Schwarms auf Informationen, die **aktuell** zum Zeitpunkt t vorliegen. Bei der *synchronen* PSO würden demnach die Informationen über Geschwindigkeit und Position vorliegen, die nach der Optimierung **aller** Partikel generiert werden. Bei der *asynchronen* PSO wird dies nicht zwingend zutreffen, da für den betrachteten Zeitpunkt t nicht gewährleistet ist, dass alle aktuellen Informationen vorhanden sind, weil noch nicht alle Partikelevaluierungsvorgänge oder sogar Optimierungsläufe abgeschlossen sind und somit vereinzelt zwangsläufig auf veraltete Informationen zurückgegriffen wird. Dies kann aus Performance-Gesichtspunkten dann auftreten, wenn die Evaluierung sehr hohe Zeiten in Anspruch nimmt, was sogar problematische Effekte auf die Ergebnisse haben kann, und eine (schlechte) quasi-optimale Lösung gefunden wird bzw. der PSO-Algorithmus sogar vollständig gehemmt ist und sich in einer „Sackgasse“ befindet. Unter Anwendung der *teil-asynchronen* PSO mit dieser beschriebenen Konfiguration, die zu einem geringen *Asynchronitätsgrad* führt, wird dieses Problem abgeschwächt. Durch die Verwendung einer sehr schnellen Fitnesskomponente kann diesem Problem ebenfalls entgegengewirkt werden, da dadurch viele potenzielle Lösungen im Rahmen einer Vorevaluation erstellt werden und das Gewicht der Lösungen, basierend auf veralteten Informationen, relativiert wird. Eine denkbar sinnvolle Fitnesskomponente stellt hierzu die NC-Parser-Applikation dar. Die Re-

²³⁰ FIFO (First in – First out) besagt, dass die Elemente, die zuerst als Input zu vermerken sind, auch zuerst verarbeitet werden.

²³¹ Für Details zu dem *Simulation-Scheduler* wird auf das Forschungsprojekt *InVorMa* verwiesen.

chendauer durch die NC-Parser-Applikation hängt allgemein von der Größe des NC-Programms (sowie von der Computerressource) ab und beträgt in der Regel wenige Millisekunden bis hin zu wenigen Sekunden.

In dem Beitrag von *Reisch et al.* (vgl. [RWL+15]) wurden Experimentiererergebnisse dargestellt, aus denen hervorgeht, dass die PSO in der *asynchronen* Konfiguration schneller konvergiert als im *synchronen* und *teil-asynchronen* Fall. Im direkten Vergleich haben dabei Populationsgröße und Dimensionsgröße nur Einfluss auf die Rechenzeit insgesamt, jedoch nicht auf das Konvergenzverhalten zwischen den einzelnen PSO-Konfigurationen. Interessant ist hierbei, dass die *synchrone* PSO (Standard-PSO) zu Laufzeitbeginn eine schnellere Konvergenz aufweist als bei der *teil-asynchronen* PSO. Jedoch wird die Standard-PSO (*synchron*) im späteren Iterationsverlauf „überholt“, wenn auch die Unterschiede nicht als sehr kritisch zu bewerten sind (vgl. Ergebnisse aus [RWL+15]).

Auch beim direkten Vergleich der gruppierten (*teil-asynchronen*) PSO ist festzustellen, dass die Konfiguration unter geringerem *Asynchronitätsgrad* schneller konvergiert als die Variante mit höherem *Asynchronitätsgrad*. Das liegt daran, dass der Anteil an veralteten Partikelinformationen aus vorangegangenen Iterationen vermehrt vorliegt, je höher der *Asynchronitätsgrad* eingestellt ist. Die *teil-asynchrone* und *asynchrone* PSO-Anwendungen lohnen sich unter der Prämisse, dass sehr viele Optimierungsergebnisse vorliegen, was bei einer „1:1-Simulation“, wie bei der vWZM, aus Performancesicht den Einsatz als weniger sinnvoll erscheinen lässt. Unter Einsatz der NC-Parser-Applikation können hingegen viele Ergebnisse vorliegen, selbst wenn die NC-Programme mehrere Tausend Zeilen Programmcode beinhalten. Dies spricht zunächst dafür, dass die *teil-asynchrone* PSO-Erweiterung der *asynchronen* PSO vorzuziehen ist, sollte der verfolgte Ansatz direkt an die Maschinensimulation angeschlossen sein und sollten für die Simulationsergebnisse wenige Zeiteinheiten vor Fertigungsbeginn benötigt werden. Dies kann nur dann der Fall sein, wenn ein sehr kleiner Planungshorizont vorliegt. Allgemein kann jedoch aufgrund der Ergebnisse festgehalten werden, dass der Ansatz der (*teil-*)*asynchronen* PSO im Anwendungsfall dieser Arbeit nicht weiter im hohen Umfang verfolgt wird, sondern vielmehr die Parallelität und Verteilung der Evaluationen durch die vWZM bevorzugt werden. Begründet ist diese Entscheidung auch dadurch, dass das Interesse an nahe-optimalen Aufspannpositionen, die gleichzeitig zu einer **reduzierten Zykluszeit** führen, dominiert und dazu vollständige Partikel-Optimierungsläufe durch die PSO notwendig sind, ohne dabei zusätzliche Informationsverluste zu riskieren. In Kombination mit der NC-Parser-Applikation ist die Rechenzeit bereits sehr gering, sodass die (*teil-*)*asynchrone* PSO ggf. schneller konvergiert, jedoch nicht unbedingt die Aufspannposition zeitnah verbessern wird. Der Ansatz wird dennoch im Hintergrund optional für die Anwendung in generischer Form beibehalten, sodass die (*teil-*)*asynchrone* PSO bei Bedarf aktiviert werden kann, ohne einen hohen Programmieraufwand leisten zu müssen.

Vorteile der *asynchronen* PSO durch die Verteilung auf mehrere Recheneinheiten – Exkurs

Die *asynchrone* PSO-Erweiterung zeigt nach Aufteilung der Evaluation auf verschiedene Rechner unter dem Einfluss von unvorhersehbaren Evaluationsausfällen ein „besseres“ Konvergenzverhalten als die *synchrone* PSO, was nachfolgend experimentell nachgewiesen ist (vgl. Abbildung 79):

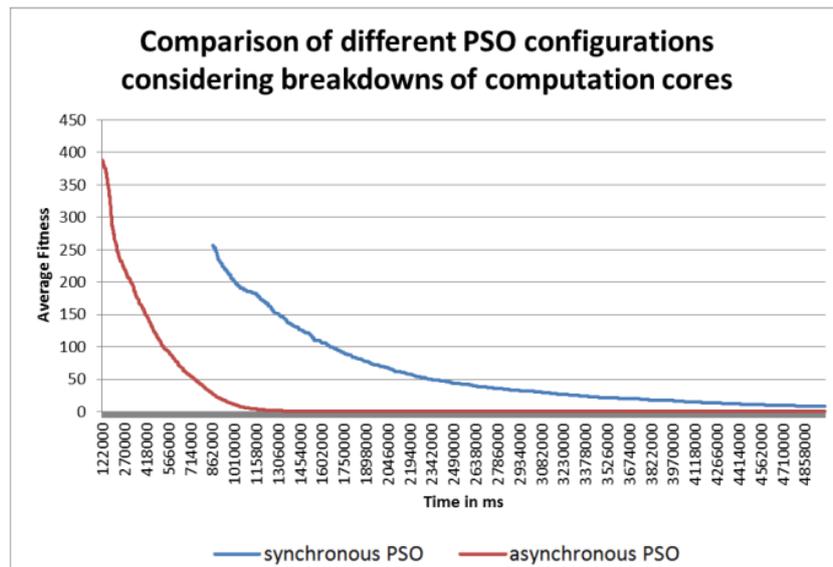


Abbildung 79: Vergleich der Fitnesswerte der asynchronen und synchronen PSO-Erweiterung bei Rechnerressourcenausfall (vgl. [RWL+15])

Das in Abbildung 79 abgebildete Experiment wurde mit 100 Wiederholungen bei 10 Dimensionen und einer Populationsgröße von 30 Partikeln durchgeführt. Um die Rechnerausfälle und Wiederverfügbarkeiten experimentell einzubringen, wurden die Erwartungswerte für die Ausfälle als $E(\text{Fehler}) = \frac{1}{p_{\text{fehler}}}$ und für die Wiederverfügbarkeit als

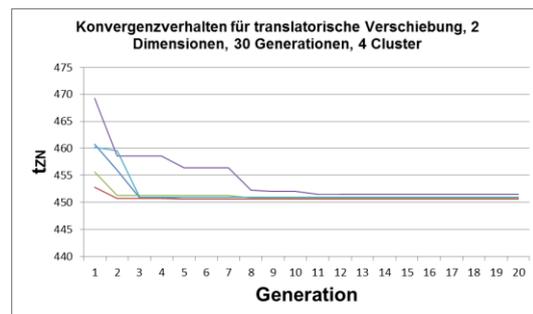
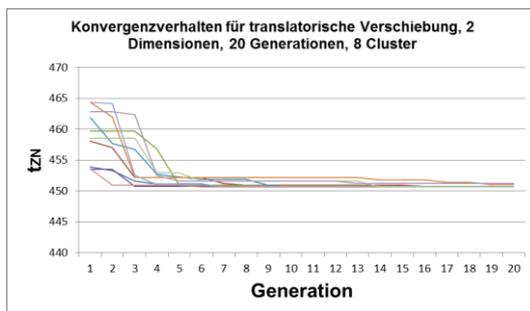
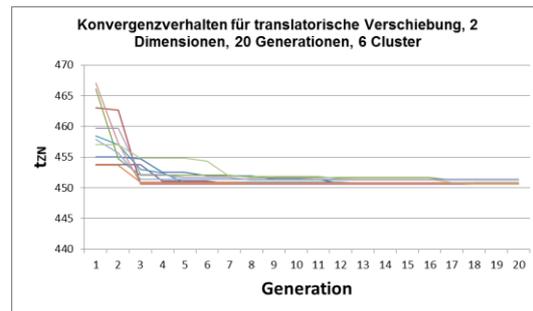
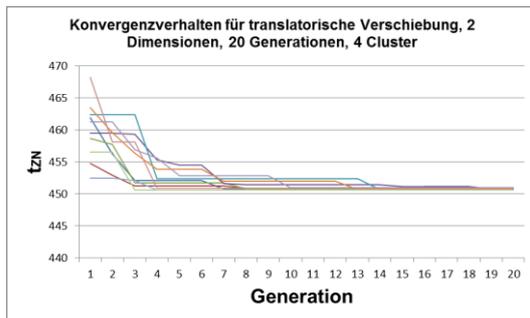
$E(\text{repariert}) = \frac{1}{p_{\text{repariert}}}$ aus der geometrischen Verteilung abgeleitet. Zur Überprüfung,

ob ein Ausfall während der Optimierung durch die PSO vorliegt, ist eine gleichmäßig verteilte Zufallszahl $p_{\text{prüfung}}$ für jeden Rechnerknoten (Computerressource) angenommen, die in diskreten Zeitschritten $t \in T_{\text{diskret}}$ die Überprüfung von p_{fehler} und $p_{\text{repariert}}$ vornimmt. T_{diskret} ist hierbei ein unendlicher Bereich von gleich großen diskreten Zeitschritten mit t als einzelner diskreter Schritt. p_{fehler} und $p_{\text{repariert}}$ nehmen die Wertebereiche $p_{\text{fehler}} \in [0,1]$ und $p_{\text{repariert}} \in [0,1]$ an. Sobald eine Rechnerressource zum Zeitpunkt t zur Verfügung steht, fällt der Knoten dann aus, wenn zum Zeitpunkt t $p_{\text{fehler}} > p_{\text{prüfung}}$ gilt. Sollte eine ausgefallene Computerressource zum Zeitpunkt t vorliegen, dann gilt der Knoten als repariert, wenn $p_{\text{fehler}} < p_{\text{prüfung}}$ gilt (vgl. [RWL+15]).

A1.2 Konvergenzverhalten der ersten Phase des Aufspannverfahrens I

Die Identifikation der Aufspannkoordinaten durch das Aufspannverfahren I weist ein schnelles Konvergenzverhalten auf: Bei den Versuchsreihen für das Werkstück B im zweidimensionalen Bereich für die x - und y -Koordinate auf der Maschinentischebene konvergiert das Verfahren mit vier Clustern innerhalb der ersten sieben Generationen. Die 13. Generation konnte als maximale Generation beobachtet werden, bis das Verfahren konvergierte.

Ähnliche Verhalten sind auch bei 6 und 8 Clustern zu beobachten. Über die präsentierten Versuchsreihen hinaus sind keine Ausreißer oder hohen Abweichungen identifizierbar. Bei 6 und 8 Clustern sind die letzten Konvergenzschritte bei der 17. Generation als späteste Annäherung zu beobachten, sodass 20 Generationen als Stopp-Kriterium zunächst für den praktischen Nutzen des Verfahrens ausreichen. Bei 30 oder 50 Generationen sind keine Verbesserungen feststellbar. Die Abbildung 80 zeigt Auszüge aus den Versuchsreihen für 20, 30 und 50 Generationen, unterteilt in die jeweilige Cluster-Konfiguration. Ein äquivalentes Konvergenzverhalten ist für das Werkstück A zu erwarten, was hier aus Gründen der geringeren Komplexität der Zielgeometrie nicht explizit aufgeführt ist.



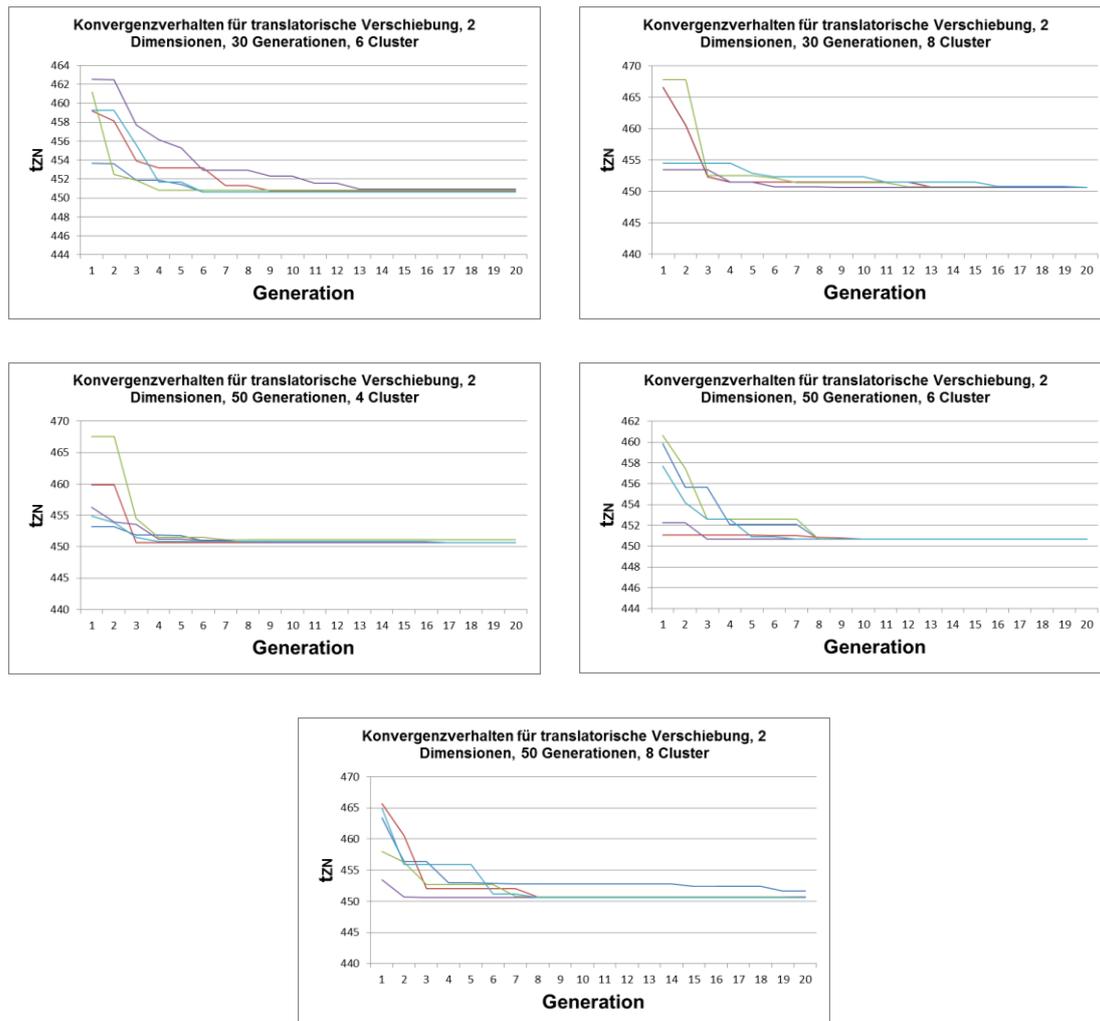


Abbildung 80: Konvergenzverhalten für eine translatorische Werkstückpositionierung bei 2 Dimensionen für 4 bis 8 Clustern und 20, 30 und 50 Generationen

Ein weitere Hinweis auf ein gutes Konvergenzverhalten der PSO in Kombination mit der NC-Parser-Applikation ist in dem Beitrag von *Weber* (vgl. [Web15]) gezeigt.

A1.3 Konfidenzanalyse der Metaheuristik

Für die Versuchsreihen für Werkstück B sind zudem Konfidenzintervalle für t_{ZN} ermittelt worden, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse verlässlich und keine unerwarteten Ausreißer anzunehmen sind, die bei Anwendung der Partikelschwarmoptimierung, beeinflusst durch diverse Konfigurationsmöglichkeiten, auftreten können.²³² Zunächst wurde der Anwendungsfall für zwei Dimensionen, d. h. die translatorische Werkstückpositionierung in x - und y -Richtung, mit 20 Generationen als Stoppkriterium und 50 sowie 100

²³² Die Ermittlung der Konfidenzintervalle setzt als Annahme eine Normalverteilung der Variablen in der Grundgesamtheit voraus. Auch bei einer nicht vorliegenden Normalverteilung kann die Berechnung als wahr angenommen werden, wenn die Stichprobengröße hinreichend groß ist ($n \leq 100$) [Sta17-ol].

Partikeln als Schwarmgröße betrachtet. Die Versuchsreihe mit drei Dimensionen umfasst die Verschiebungs-/Rotationsmöglichkeit der Koordinaten für x , y und θ . Bei vier Dimensionen sind die drei translatorischen Verschiebungen in die x -, y - und z -Richtung sowie die Orientierung θ gemeint. Die Versuchsreihe mit zwei Dimensionen und 50 Partikeln erfolgt unabhängig von der Anzahl der Cluster bzw. Maschineninstanzen und enthält eine Stichprobengröße von $n = 884$ Durchführungen. Die dreidimensionale Stichprobengröße erfolgte mit $n = 448$. Bei 100 Partikeln betragen die Stichprobengrößen für die zweidimensionalen Aufspannkoordinaten $n = 705$ und für drei Dimensionen $n = 589$. Die Clusterdefinition kann hierfür vernachlässigt werden, da sie nur die (Anzahl) der potenziellen Lösungen enthält und dadurch nur die Simulationsreihenfolge (Auftragsfolge) zur Kollisionsüberprüfung bestimmt. Es gilt dieselbe Initialaufspannung wie bei den regulären Versuchsergebnissen. Die Tabelle 43 zeigt die Ergebnisse für die jeweiligen Konfidenzintervalle für die jeweilige Dimensionskonfiguration der Stichproben.

Tabelle 43: Konfidenzanalyse der Versuchsreihen für Werkstück B zur Werkstückpositionierung bei Standardeinstellung

$\overline{X_{t_{ZN}}}$, $\overline{X_u}$, $\overline{X_o}$ in Einheiten [s]	Versuchsreihen mit 2 Dimensionen, 50 Partikeln	Versuchsreihen mit 3 Dimensionen, 50 Partikeln	Versuchsreihen mit 2 Dimensionen, 100 Partikeln	Versuchsreihen mit 3 Dimensionen, 100 Partikeln
Stichprobengröße, n	884	448	705	589
Arithmetisches Mittel, $\overline{X_{t_{ZN}}}$	451,8812679	451,850229393006	451,685053802617	451,838285553286
Standardabweichung, σ	0,717007133	0,73446938582739	0,766365389411102	0,709513883330327
Wahrscheinlichkeit der Nullhypothese, α	0,01	0,01	0,01	0,01
Konfidenzintervall, e	0,0621176	0,0893823504245241	0,0743461363737687	0,0753043961001346
Untere Schranke, $\overline{X_u}$	451,819150294951	451,760847042582	451,610707666243	451,762981157186
Obere Schranke, $\overline{X_o}$	451,943385425032	451,939611743431	451,75939993899	451,913589949387

Für die Versuche mit zweidimensionaler Werkstückpositionierung kann davon ausgegangen werden, dass bei erneuten Versuchsdurchführungen unter gleichen Bedingungen das arithmetische Mittel für t_{ZN} bei einer Wahrscheinlichkeit von 99 % zwischen 451,819150294951 s und 451,943385425032 s liegen wird. Bei der Konfiguration von 100 Partikeln und zwei Dimensionen liegt das arithmetische Mittel für t_{ZN} zwischen 451,610707666243 s und 451,75939993899 s. Im dreidimensionalen Fall liegt bei 50 Partikeln das arithmetische Mittel für t_{ZN} zu 99 % zwischen 451,760847042582 s und 451,939611743431 s und bei 100 Partikeln zwischen 451,762981157186 s und 451,913589949387 s. Durch die Konvergenz und die Rückmeldung der NC-Parser-Applikation aus der jeweils letzten Generation der Anwendung der Metaheuristik kann demnach erwartet werden, dass sich t_{ZN} bei einer erneuten Versuchsdurchführung in vergleichbarem Maße verringert. Das heißt, dass eine Aktualisierung der Werkstückposition

durch das global beste t_{ZN} durchgeführt werden würde und das Suchverfahren (Aufspannverfahren I) auch hierbei ein geringes Konfidenzintervall aufweisen würde – es sind keine Ausreißer zu erwarten.

A1.4 Programmierwerkzeuge und Rechnereinrichtung

Zur technischen Umsetzung der Reduzierung der Zykluszeit durch die modellbasierte Werkstückpositionierung sind verschiedene Schnittstellen und Programme notwendig. Bei der Datenbank handelt es sich um eine *SQL-Datenbank* mit *php-Skripten* zur Schnittstelle zur Nutzeroberfläche. Das *Polling-Verfahren* sowie die *asynchrone*, *teil-asynchrone* und *synchrone* Standard-PSO (Aufspannverfahren I und II) sind in der objektorientierten Programmiersprache *Java* programmiert. Die Verteilung durch den Scheduler erfolgt mittels *C#* bzw. *F#* (ASP.net). Grundsätzlich sind die Programmiertechniken für die Umsetzung der Konzepte beliebig wählbar, eine objektorientierte Programmiersprache wird jedoch empfohlen. Im Rahmen der Arbeit liegt der Fokus explizit auf den erzielten Ergebnissen der Werkstück- und Werkzeugpositionierung und nicht auf den Programmiertechniken für den zugrunde liegenden *Quellcode*.

Die Rechnerarchitektur für die Berechnung der Werkstück- und Werkzeugpositionierung besteht aus mehreren Rechnerinstanzen. Die Optimierungsmodelle für die Werkzeugpositionierung wurden durch einen *Intel NUC* mit einem Prozessor Intel(R) Core (TM) i5-4250U CPU mit jeweils 1,3 GHz und 16 GB Arbeitsspeicher, Betriebssystem MS Windows 10 Enterprise, x64 (64-Bit-Betriebssystem) durchgeführt. Die Ansteuerung erfolgte durch ein *Lenovo ThinkPad* mit einem Prozessor Intel(R) Core (TM) i5-3320 CPU mit jeweils 2,6 GHz, 8 GB Arbeitsspeicher und dem Betriebssystem MS Windows 7 Enterprise SE x64 (64-Bit-Betriebssystem). Die Werkstückpositionierung wird durch einen Standardrechner, wie z. B. den *NUC* oder *Lenovo ThinkPad*, über die Onlineschnittstelle durch eine Auftragsvergabe gestartet. Die Simulation erfolgt auf Rechnerinstanzen, auf denen eine Server-Virtualisierung durch VM Ware *vSphere Hypervisor* eingerichtet ist. Auf dem Demonstrator-Rechner, der die Werkstückpositionierung ansteuert, befindet sich der *vSphere-Client*. Bei den Serverrechnern handelt es sich ebenfalls um Rechner der Marke *Lenovo ThinkPad* mit einem Prozessor Intel(R) Core (TM) i7-2820QM CPU mit jeweils 2,3 GHz und 16 GB Arbeitsspeicher. Für die Simulationsinstanzen sind 8 GB Arbeitsspeicher durch die virtuelle Maschine reserviert.

A1.5 Pseudocode der PSO und des K-Means-Algorithmus

Partikelschwarmoptimierung (PSO):

```

for each  $x_i^t \in X$ 
    do initialisiere  $x_i^t$  auf  $p_i \in \mathbb{R}^d$ 
    Setze  $p_i$  als lokales Optimum  $p_{lb,i}$ 
    If  $g(p_{lb,i}(t)) \leq g(p_{gb,i}(t))$ 
    Setze  $p_{lb,i} = p_{gb,i}$ 
    Setze  $v_i^t$  zufällig
end for
while Stoppkriterium = false do
    for each  $x_i^t \in X$  do
        Ermittle  $v_i^{t+1}$ 
        Ermittle  $x_i^{t+1}$ 
        Ermittle  $p_{lb,i}$ 
        Ermittle  $p_{gb,i}$ 
    end for
end while

```

Pseudocode 2: PSO-Algorithmus (vgl. [KeEb01], [KeEb95])

K-Means:

```

 $t = 0$ 
do Initialisiere Centroids zufällig  $c_1 \dots c_i, \dots, c_k \in C$ 
repeat
 $t \leftarrow t + 1$ 
 $c_j \leftarrow \emptyset$  für alle  $j = 1, \dots, k$ 
    For all  $x_j \in D$  do
         $\hat{j} \leftarrow \operatorname{argmin} \{ \|x_j - c_i\|^2 \}$ 
         $c_j \leftarrow c_j \cup \{x_j\}$ 
    end for
    For all  $i = 1, \dots, k$  do
         $c_i \leftarrow \frac{1}{|c_i|} \sum_{x_j \in c_i} x_j$ 
    end for
until  $\sum_{i=1}^k \|c_i - c_i^{t-1}\|^2 \leq q_{stop}$ 
end

```

Pseudocode 3: K-Means Cluster-Algorithmus (vgl. [ZaWa14] S. 335)

A1.6 Ergänzung zum Datenbankmodell für die Werkstückpositionierung

Tabelle 44 beinhaltet die relevanten Attribute der Entitäten des Datenbankmodells, das der Werkstückpositionierung über das Aufspannverfahren I zugrunde liegt.

Tabelle 44: Attribute der Entitäten der Datenbank für die Werkstückpositionierung

produc- tion_step_has_work- place	VMDE	nc_program	machine_type	event	vmde_job
production_step_id	id	id	id	id	id
workplace_id	vmde_job_id	timestamp	name	type	vmde_id
processing_time	substring_number	code	manufacturer	metadata	status
setup_time	substring	processing_ time	vmde	status	valididty
extra_work_time	hash	docking_ frame_ workpiece	Xml_specification	timestamp	ma- chine_id
valid		docking_ frame_work- piece_clamp			Simula- tion_type
optimized		number_ pro- duced_work- piece			position
vmde_id					produc- tion_step _has_wor kplace_id
production_step	production_step_ has_predecessor	produc- tion_or- der_has_pro- duction_step	Production_ order	Setup_ position	
id	production_step_id	produc- tion_order_id	id	id	
name	produc- tion_step_prede- cessor_id	produc- tion_step_id	name	produc- tion_step_h as_work- place_id	
Geometrical_mate- rial_element			penalty_cost	x_position	
operator_required			providing_date	y_position	
vmde_id			number	z_position	
nc_id			deadline	anlge_posi- tion	
existing_quantity			accomplished	Status_colli- sion	
			outsourcing_pos- sible	Posi- tion_frame_ id	
			outsourcing_cost		

A1.7 Schnittstelle auf XML-Basis

Die Datenschnittstelle zu der vWZM erfolgt durch das Format VMDE. Dieses Format ist an den XML-Standard angelehnt. Gerade die Schaffung von Standards, die Produkt- und Systemübergreifend in verschiedenen Branchen gelten, ist noch immer eine gegenwärtige Herausforderung. Dies zeigt sich z. B. in der Entwicklung von dem XML-basierten Datenformat AML²³³:

AML ist ein Datenformat zur Standardisierung des Datenaustausches im Bereich der Produktionssysteme – genauer „synergetischer Kombinierbarkeit aller Informationsinhalte, die im Entwurfsprozess von Produktionssystemen relevant sind und zwischen Entwurfswerkzeugen ausgetauscht werden sollen“ (vgl. [LüSc14] S. 38). Das Datenformat wurde als offenes, neutrales XML-basiertes Format entwickelt, was die Anforderung eines frei nutzbaren Industriestandards erfüllen soll – insb. der Transfer zwischen den einzelnen System- und Datentypen und -modellen, womit eine ganzheitliche Schnittstelle zwischen verschiedenen rechnerbasierten Ingenieurswerkzeugen geschaffen werden soll. Hierzu wurde kein „neues“ Format geschaffen, sondern es wurden bestehende und etablierte Datenformate verschiedener Systeme verwendet und in eine nutzbare logische Gesamtform adaptiert, zusammengeführt und bei Bedarf erweitert. Bislang werden spezifische Daten aus der Fabrikplanung, insb. Fabrikstruktur und -layout sowie Geometrie- und Kinematikdaten inklusive logische Beschreibung abgebildet. Auch Informationsmengen zur Modellierung und Integration von mechatronischen Systemen, Anlagebausteine und -strukturen, das Verhalten von Steuerung sowie Netzwerke sind mittels AML-Format darstellbar (vgl. [LüSc14] S. 38). Federführend in der Entwicklung ist das Industriekonsortium *AutomationML e.V.*

Ein Format wie AML ist für den Einsatz unterschiedlicher Systeme über den ganzen Produktlebenszyklus hinaus sinnvoll, damit ein umständliches Konvertieren von Daten vermieden wird und alle produktionsrelevante Daten für die Darstellung von Produktionsprozessen innerhalb eines Rahmen-Formats integriert sind. Dies zeigt sich insb. für die Verarbeitung und Kommunikation von Kinematikdaten, Geometriedaten von Werkstück und Maschinen, insb. Robotern, die in Zusammenarbeit mit dem Menschen in einer Simulationsumgebung validiert werden müssen.

Jedes rechnergestützte Ingenieurwerkzeug hat ein individuelles Datenmodell, sodass sich diese Modelle zwischen zwei oder mehreren Systeme unterscheiden können und Inkompatibilitäten vorliegen. Um einen Datenaustausch trotzdem zu gewährleisten, muss das datensendende System die gesendeten Daten in ein Datenaustauschformat, bei dem auch ein Umwandeln des eigenen Datenmodells in das des Austauschformats stattfindet, ablegen. Das Empfängersystem liest die Daten aus dem Austauschformat ein und interpretiert die Daten vor dem Hintergrund des eigenen Datenmodells. Auf diese Weise findet durch den In- und Export der Daten ein Mapping der Datenmodelle der beteiligten Systeme statt. Hierzu ist es dennoch wichtig, das Mapping und die Modellierung der verwendeten

²³³ AML steht für **A**utomation **M**arkup **L**anguage und wird in der Literatur auch AutomationML abgekürzt.

Daten aufeinander abzustimmen, d. h. exakt zu spezifizieren, das mit zunehmender Anzahl der beteiligten Systeme komplexer wird. (vgl. [ScLü15])

AML und VMDE

Im Rahmen der Arbeit wird als vergleichsweise Ähnliche Schnittstelle das für die vWZM vorgesehene VMDE-Format verwendet, woraus sich schließen lässt, dass fertigungsrelevante Daten für die Simulationsumgebung „Werkzeugmaschine“ in dem vorliegenden Fall noch nicht in das AML-Format integriert ist. Das VMDE-Format erfüllt aber vergleichbare Funktionen wie das AML-Format und ist zunächst auf die Geometriedaten der Maschine, des Werkstücks (inklusive Spannmittel) und auf das NC-Programm und die dazugehörigen Konfigurationskoordinaten beschränkt. Da die Maschinensteuerung im Kontext des Simulationsmodells ein externes System ist, ist sie inhaltlich nicht für das VMDE-Format relevant. Das System vWZM kann aus Gesichtspunkten der Datenschnittstelle als geschlossene Insellösung bezeichnet werden, weil in der Prozesskette des Produkts keine komplexe Weiterverwendung des VMDE-Formats für weitere Ingenieurwerkzeuge vorgesehen ist – ausgenommen sind die CAM-Programme zur Generierung der NC-Programme, die aber als „Textrohform“ immer in VMDE und auch in AML integrierbar sind. Vielmehr kann das VMDE-Format mit allen Informationen zur Maschine, zum Werkstück und zum NC-Programm als gesonderter Unter-Knoten in das AML eingliedert werden, sodass, sobald die Kollisionserkennung in der spanenden Werkstattfertigung stattfindet, diese auch für einen ganzheitlichen Produktionsprozess integriert und abgebildet werden kann.

A1.8 Ergänzungen zur Kreisinterpolation bei Kreisendpunkt und Kreisradius

Ausgehend von den Gleichungen 5.19 und 5.20 folgt durch Gleichsetzen:

$$(X_{t-1} - X_M)^2 + (Y_{t-1} - Y_M)^2 = (X_t - X_M)^2 + (Y_t - Y_M)^2$$

Zur Vereinfachung für die Lösung gilt hier $x = X_M, y = Y_M, a = X_{t-1}, b = Y_{t-1}, c = X_t, d = Y_t$. Des Weiteren gilt äquivalent für die Berechnung von $X_{M,1}, X_{M,2}, Y_{M,1}$ und $Y_{M,2}$ mindestens $X_{t-1} \neq X_t \vee X_{t-1} = X_t \neq 0$ und $Y_{t-1} \neq Y_t \vee Y_{t-1} = Y_t \neq 0$.

Nach computergestützter Berechnung folgt für $Y_{M,1}$:

$$\left\{ \left\{ y \rightarrow \left(2b + \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} - \frac{4ab}{2a-2c} + \frac{4bc}{2a-2c} - \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} + 2d - \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4ad}{2a-2c} - \frac{4cd}{2a-2c} + \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} - \sqrt{\left(\left(-2b - \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} + \frac{4ab}{2a-2c} - \frac{4bc}{2a-2c} + \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} - 2d + \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4ad}{2a-2c} + \frac{4cd}{2a-2c} - \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} - \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right)} \right. \right. \\ \left. \left(a^2 + b^2 + \frac{a^4}{(2a-2c)^2} + \frac{2a^2b^2}{(2a-2c)^2} + \frac{b^4}{(2a-2c)^2} - \frac{2a^3}{2a-2c} - \frac{2ab^2}{2a-2c} + \frac{2a^2c}{2a-2c} + \frac{2b^2c}{2a-2c} - c^2 - \frac{2a^2c^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2c^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ac^2}{2a-2c} - \frac{2c^3}{2a-2c} + \frac{c^4}{(2a-2c)^2} - d^2 - \frac{2a^2d^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ad^2}{2a-2c} - \frac{2cd^2}{2a-2c} + \frac{2c^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{d^4}{(2a-2c)^2} \right) \right) \left. \right\} \left. \right\} \left(2 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \right) \right\},$$

Abbildung 81: Computergestützte Berechnung von $Y_{M,1}$

Nach computergestützter Berechnung folgt für $Y_{M,2}$:

$$\begin{aligned}
 \{y \rightarrow & \left(2b + \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} - \frac{4ab}{2a-2c} + \frac{4bc}{2a-2c} - \right. \\
 & \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} + 2d - \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4ad}{2a-2c} - \\
 & \left. \frac{4cd}{2a-2c} + \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} + \right. \\
 & \sqrt{\left(\left(-2b - \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} + \frac{4ab}{2a-2c} - \frac{4bc}{2a-2c} + \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} - \right. \right. \\
 & \left. \left. 2d + \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4ad}{2a-2c} + \frac{4cd}{2a-2c} - \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} + \right. \right. \\
 & \left. \left. \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} - \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \right. \\
 & \left(a^2 + b^2 + \frac{a^4}{(2a-2c)^2} + \frac{2a^2b^2}{(2a-2c)^2} + \frac{b^4}{(2a-2c)^2} - \frac{2a^3}{2a-2c} - \right. \\
 & \frac{2ab^2}{2a-2c} + \frac{2a^2c}{2a-2c} + \frac{2b^2c}{2a-2c} - c^2 - \frac{2a^2c^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2c^2}{(2a-2c)^2} + \\
 & \frac{2ac^2}{2a-2c} - \frac{2c^3}{2a-2c} + \frac{c^4}{(2a-2c)^2} - d^2 - \frac{2a^2d^2}{(2a-2c)^2} - \\
 & \left. \left. \frac{2b^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ad^2}{2a-2c} - \frac{2cd^2}{2a-2c} + \frac{2c^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{d^4}{(2a-2c)^2} \right) \right) \Bigg/ \\
 & \left. \left(2 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \right) \right\}
 \end{aligned}$$

Abbildung 82: Computergestützte Berechnung von $Y_{M,2}$

Aus $Y_{M,1}$ folgt dann $X_{M,1}$:

$$\left\{ \left\{ x \rightarrow \frac{1}{-2a+2c} \right. \right.$$

$$\left(-a^2 - b^2 + c^2 + d^2 + \left(b \left(2b + \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} - \frac{4ab}{2a-2c} + \frac{4bc}{2a-2c} - \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} + 2d - \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4ad}{2a-2c} - \frac{4cd}{2a-2c} + \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} - \sqrt{\left(\left(-2b - \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} + \frac{4ab}{2a-2c} - \frac{4bc}{2a-2c} + \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} - 2d + \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4ad}{2a-2c} + \frac{4cd}{2a-2c} - \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} - \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \left(a^2 + b^2 + \frac{a^4}{(2a-2c)^2} + \frac{2a^2b^2}{(2a-2c)^2} + \frac{b^4}{(2a-2c)^2} - \frac{2a^3}{2a-2c} - \frac{2ab^2}{2a-2c} + \frac{2a^2c}{2a-2c} + \frac{2b^2c}{2a-2c} - c^2 - \frac{2a^2c^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2c^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ac^2}{2a-2c} - \frac{2c^3}{2a-2c} + \frac{c^4}{(2a-2c)^2} - d^2 - \frac{2a^2d^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ad^2}{2a-2c} - \frac{2cd^2}{2a-2c} + \frac{2c^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{d^4}{(2a-2c)^2} \right) \right) \right) / \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) - \left(d \left(2b + \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} - \frac{4ab}{2a-2c} + \frac{4bc}{2a-2c} - \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} + 2d - \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4ad}{2a-2c} - \frac{4cd}{2a-2c} + \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} - \sqrt{\left(\left(-2b - \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} + \frac{4ab}{2a-2c} - \frac{4bc}{2a-2c} + \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} - 2d + \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4ad}{2a-2c} + \frac{4cd}{2a-2c} - \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} - \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \left(a^2 + b^2 + \frac{a^4}{(2a-2c)^2} + \frac{2a^2b^2}{(2a-2c)^2} + \frac{b^4}{(2a-2c)^2} - \frac{2a^3}{2a-2c} - \frac{2ab^2}{2a-2c} + \frac{2a^2c}{2a-2c} + \frac{2b^2c}{2a-2c} - c^2 - \frac{2a^2c^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2c^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ac^2}{2a-2c} - \frac{2c^3}{2a-2c} + \frac{c^4}{(2a-2c)^2} - d^2 - \frac{2a^2d^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ad^2}{2a-2c} - \frac{2cd^2}{2a-2c} + \frac{2c^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{d^4}{(2a-2c)^2} \right) \right) \right) / \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \right) \left. \right\}$$

Abbildung 83: Computergestützte Berechnung von $X_{M,1}$

Aus $Y_{M,2}$ folgt dann $X_{M,2}$:

$$\left\{ \left\{ x \rightarrow \frac{1}{-2a+2c} \right. \right.$$

$$\left(-a^2 - b^2 + c^2 + d^2 + \left(b \left(2b + \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} - \frac{4ab}{2a-2c} + \frac{4bc}{2a-2c} - \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} + 2d - \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4ad}{2a-2c} - \frac{4cd}{2a-2c} + \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} + \sqrt{\left(\left(-2b - \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} + \frac{4ab}{2a-2c} - \frac{4bc}{2a-2c} + \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} - 2d + \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4ad}{2a-2c} + \frac{4cd}{2a-2c} - \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} - \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \left(a^2 + b^2 + \frac{a^4}{(2a-2c)^2} + \frac{2a^2b^2}{(2a-2c)^2} + \frac{b^4}{(2a-2c)^2} - \frac{2a^3}{2a-2c} - \frac{2ab^2}{2a-2c} + \frac{2a^2c}{2a-2c} + \frac{2b^2c}{2a-2c} - c^2 - \frac{2a^2c^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2c^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ac^2}{2a-2c} - \frac{2c^3}{2a-2c} + \frac{c^4}{(2a-2c)^2} - d^2 - \frac{2a^2d^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ad^2}{2a-2c} - \frac{2cd^2}{2a-2c} + \frac{2c^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{d^4}{(2a-2c)^2} \right) \right) \right) / \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) + \left(d \left(2b + \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} - \frac{4ab}{2a-2c} + \frac{4bc}{2a-2c} - \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} + 2d - \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4ad}{2a-2c} - \frac{4cd}{2a-2c} + \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} + \sqrt{\left(\left(-2b - \frac{4a^2b}{(2a-2c)^2} - \frac{4b^3}{(2a-2c)^2} + \frac{4ab}{2a-2c} - \frac{4bc}{2a-2c} + \frac{4bc^2}{(2a-2c)^2} - 2d + \frac{4a^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4b^2d}{(2a-2c)^2} - \frac{4ad}{2a-2c} + \frac{4cd}{2a-2c} - \frac{4c^2d}{(2a-2c)^2} + \frac{4bd^2}{(2a-2c)^2} - \frac{4d^3}{(2a-2c)^2} \right)^2 - 4 \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \left(a^2 + b^2 + \frac{a^4}{(2a-2c)^2} + \frac{2a^2b^2}{(2a-2c)^2} + \frac{b^4}{(2a-2c)^2} - \frac{2a^3}{2a-2c} - \frac{2ab^2}{2a-2c} + \frac{2a^2c}{2a-2c} + \frac{2b^2c}{2a-2c} - c^2 - \frac{2a^2c^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2c^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ac^2}{2a-2c} - \frac{2c^3}{2a-2c} + \frac{c^4}{(2a-2c)^2} - d^2 - \frac{2a^2d^2}{(2a-2c)^2} - \frac{2b^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{2ad^2}{2a-2c} - \frac{2cd^2}{2a-2c} + \frac{2c^2d^2}{(2a-2c)^2} + \frac{d^4}{(2a-2c)^2} \right) \right) \right) / \left(\frac{4b^2}{(2a-2c)^2} - \frac{8bd}{(2a-2c)^2} + \frac{4d^2}{(2a-2c)^2} \right) \right) \left. \right\}$$

Abbildung 84: Computergestützte Berechnung von $X_{M,2}$

A2 Ergänzung zur Werkzeugpositionierung

A2.1 Messung und Versuchsdurchführung auf Basis der Span-zu-Span-Zeit

Die Messungen zur Ermittlung der Prozesszeiten für die Werkzeugpositionierung, insb. MWZW, wurden an einer 3-Achs-Fräsmaschine Typ *Emcomill E 350*, Fabrikat *EMCO* der Firma Emco Maier GmbH vorgenommen (vgl. auch Tabelle 48 in Anhang A2.4). Die Werkzeugmagazinkapazität liegt bei 20 Werkzeugplätzen. Die Werkzeuge werden in einem Scheibenmagazin abgelegt, was eine maximale Traglast (zulässige Masse nach Herstellerangaben) von 60 kg beinhaltet. Für die Ermittlung der SSZ werden eine repräsentative Bearbeitungsposition und Einrichtung der Werkzeugmaschine vorgenommen. Demnach liegt die repräsentative Bearbeitungsposition P_B bei $X_{PB} = 175 \text{ mm}$, $Y_{PB} = 125 \text{ mm}$, $Z_{PB} = 225 \text{ mm}$. Der maximale Verfahrweg der Maschine im Arbeitsraum liegt bei $X_A = 350 \text{ mm}$, $Y_A = 250 \text{ mm}$, $Z_A = 300 \text{ mm}$. X_{PB} und Y_{PB} sind die Koordinaten als Tischzentrum, hier die halbe Verfahrweglänge. Z_{PB} ergibt sich durch das Produkt $0,25 \cdot Z_A$, gemessen ab der Tischoberfläche. Die Werkzeugwechselposition liegt fest definiert bei $X_{PW} = 296 \text{ mm}$, $Y_{PW} = 16 \text{ mm}$, $Z_{PW} = 143 \text{ mm}$. Der geforderte Mindestabstand, ausgehend von der Werkzeugspitze zur Bearbeitungsposition, beträgt 50 mm und wird nicht unterschritten. Die Werkzeugaufnahme ist SK Nr. 30, wodurch sich eine repräsentative Werkzeuglänge WL_r mit $160 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ergibt. Alle Positionen und Werkzeuglängen beziehen sich auf die Werkzeugspitze. Die vorgesehene Eingriffszeit beträgt $t_h = 10 \text{ s}$, und die Nenndrehzahl des rotierenden Werkzeugs beträgt $n_c = 1800 \text{ min}^{-1}$. Die SSZ-Messung wird ausgehend von drei Messungen durchgeführt:

Die erste zu ermittelnde Zeit bezieht sich auf das im Werkzeugmagazin am weitesten entfernte Werkzeug, das zuerst auszuwechseln ist (vgl. [VDI2852]). Die zweite Zeit bezieht sich auf den Wechselvorgang mit dem einzuwechselnden Werkzeug, das sich auf dem rechten direkten Nachbarplatz des ersten ausgewechselten Werkzeugs befindet. Die dritte Zeit ist äquivalent zur zweiten Zeit, wobei das einzuwechselnde Werkzeug als direkter Nachbar links von dem ersten auszuwechselnden Werkzeug positioniert ist. Der Messprozess beginnt, indem das erste Werkzeug eingewechselt ist und in die repräsentative Bearbeitungsposition gefahren wird. Die festgelegte Drehzahl wird eingeschaltet, und das Werkzeug verweilt 10 s in der Position unter einem geringen Vorschub. Anschließend erfolgt der Werkzeugwechsel. Diese Prozedur wird dreimal wiederholt, sodass für jede ermittelte Position der drei einzuwechselnden Werkzeuge t_1 , t_2 und t_3 vorliegen. Um nun die SSZ zu erhalten, werden 30 Sekunden subtrahiert und die Messung durch 3 dividiert (vgl. [VDI2852] Blatt 1):

$$t_{1,2,3} = \frac{t_{1,2,3}^{ges} - 30}{3} \quad (\text{A2.1-1})$$

Die ermittelte durchschnittliche SSZ über alle Messreihen ist in der nachfolgenden Tabelle 45 angeführt (vgl. [VDI2852]):

Tabelle 45: Span-zu-Span-Zeiten nach VDI 2852 Blatt 1

SSZ [s]	\bar{x} arithmetisches Mittel [s]	σ^2 Varianz	σ Standardabweichung	\tilde{x} Median [s]
t_1	5,45	0,130445752	0,361172745	5,548333333
t_2	5,17	0,159940967	0,399926202	5,24
t_3	5,128684211	0,074766982	0,273435517	5,255

A2.2 Softwarewerkzeuge

Die technische Umsetzung der Werkzeugmagazinpositionsstrategie und die daraus abgeleitete Magazinplatzbestückung (Startbelegung) auf Basis von NC-Programmen wurden mit der Software *MATLAB R2015b academic use* (vgl. [MAT15]) umgesetzt. Aktuell ist es möglich, objektorientiertes Programmieren mithilfe der Software *MATLAB* zu bewerkstelligen, sodass dazu die eine Klasse (Name: *Model*) entwickelt wurde, die das Simulationsmodell abbildet, das in Kapitel 5.2.2 und als Ablaufdiagramm in Abbildung 21 dargestellt ist. Die initiale Magazinbestückung und Werkzeugpositionierung wird durch die Klasse *Simulation* durchgeführt. Dabei werden menschliche Handlungsprozesse wie in Abbildung 22 bis Abbildung 25 (vgl. Kapitel 5.2.2.3) simuliert. Das entwickelte MWZW berücksichtigt als Grundlage für das Wechselverhalten der Maschine die gemessenen Zeiten der realen Maschinenanwendung aus Kapitel 5.2.2.4. Die Werkzeugwechselzeit, ausgehend von der Werkzeug-Operations-Reihenfolge des NC-Programms, erfolgt durch die Klasse *manualMagazine* unter Eingabe einer Werkzeugmagazinausgangsbelegung. Dabei können die Zustände des Werkzeugmagazins „*leer*“, „*teilweise gefüllt*“ oder „*vollständig gefüllt*“ sein. Eine konkrete Belegung kann auch manuell eingetragen werden.

Die Optimierung des initialen Belegungszustands erfolgt durch die *Optimization-Toolbox*, die die Software *MATLAB* zur Verfügung stellt, in der der GA hinterlegt ist. Daneben können noch alternative *Solver* ausgewählt werden, wie z. B. *constrained nonlinear minimization*, *unconstrained nonlinear minimization*, *linear programming* sowie diverse Metaheuristiken. Die Abbildung 85 veranschaulicht die Toolbox. In der Toolbox kann auch das Stoppkriterium definiert sowie die Konfiguration zur Datenausgabe vorgenommen werden. Abbildung 86 zeigt exemplarisch das Konvergenzverhalten des GA eines Optimierungslaufs im MWZW unter Anwendung der Toolbox.

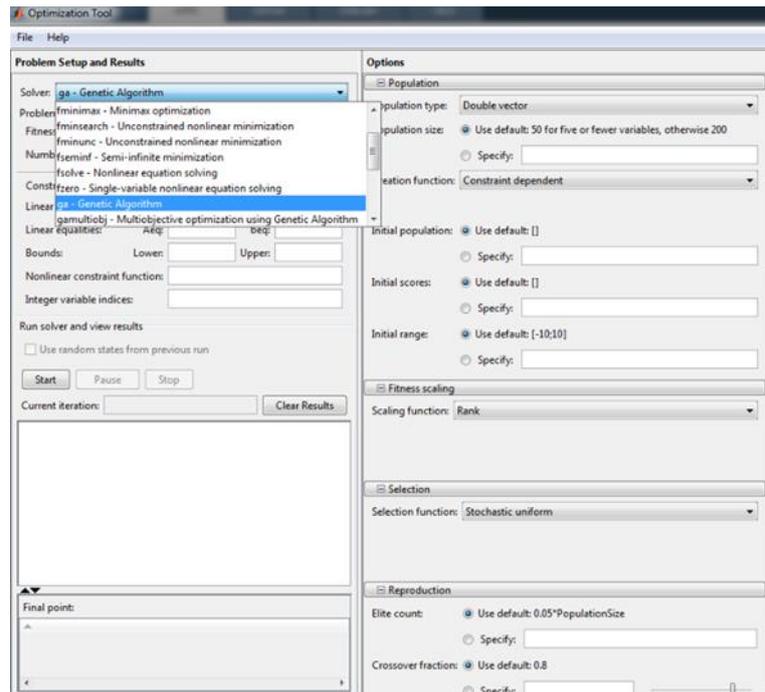


Abbildung 85: *Optimization-Toolbox-GUI* von MATLAB R2015b

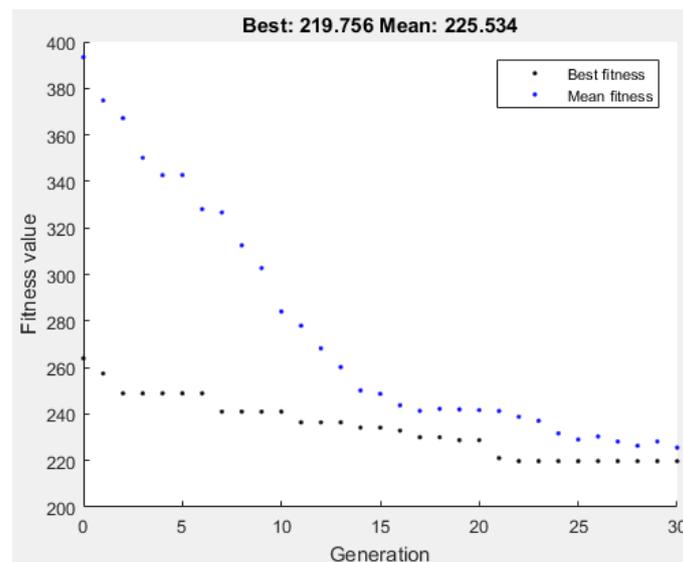


Abbildung 86: Konvergenz des GA bei Anwendung des MWZW

Die Verwendung von *MATLAB* erspart hierzu einen hohen Programmieraufwand, und die einzelnen Applikationen können auch automatisiert aufgerufen werden, sodass die Berechnungen für die Werkzeugpositionierung verlässlich und fehlerfrei durchführbar sind.

Zur Lösung und Berechnung des linearen Optimierungsmodells (vgl. Kapitel 5.2.7) wird der *Solver* für mathematische Probleme *Gurobi Optimizer* (*Gurobi GmbH* und *Gurobi EMEA*) genutzt (vgl. [Gur16-ol]).

A2.3 Reihenfolge der Werkzeuge aus dem NC-Programm *Schlittenplatte*

Das NC-Programm für die Schlittenplatte (*Strothmann*), das für die Erprobung des MWZW dient, beinhaltet 33 Werkzeugwechseloperationen bei 26 Werkzeugen. Die Reihenfolge, in der die Werkzeugwechsel durch das NC-Programm hervorgerufen werden, ist in Tabelle 46 konkretisiert. Die Werkzeuge weisen einen Magazinplatzbedarf von 1 auf. Werkzeuge mit den T-Nummern T3, T29, T150 benötigen zwei Magazinplätze, und T200 benötigt drei Magazinplätze.

Tabelle 46: NC-Befehl-Reihenfolge für die Werkzeugaufrufe während der Fertigung

Laufende Nummer	T-Nummer	Technologie	Geometrische Einschränkung/ Anzahl der Werkzeugplätze
1	T15	Bohren	1
2	T169	Schruppen	1
3	T93	Schlichten	1
4	T22	Fräsen	1
5	T169	Schruppen	1
6	T200	Fräsen	3
7	T29	Fräsen	2
8	T23	Fräsen	1
9	T19	Fräsen	1
10	T4	Bohren	1
11	T5	Bohren	1
12	T35	Bohren	1
13	T59	Bohren	1
14	T67	Bohren	1
15	T68	Bohren	1
16	T149	Fräsen	1
17	T72	Bohren	1
18	T150	Fräsen	2
19	T1	Bohren	1
20	T2	Bohren	1
21	T3	Bohren	2
22	T6	Bohren	1
23	T10	Bohren	1
24	T20	Fräsen	1
25	T35	Bohren	1
26	T59	Bohren	1
27	T1	Bohren	1
28	T3	Bohren	2
29	T21	Fräsen	1
30	T35	Bohren	1
31	T7	Bohren	1
32	T2	Bohren	1
33	T18	Fräsen	1

A2.4 Technische Daten der realen Maschine

Die technischen Angaben zur Werkzeugmaschine *Emcomill E350* als Vorbild für das MWZW für die Werkzeugpositionierung (vgl. 5.2 und 6.3.1.1) sind in den Tabelle 47 und Tabelle 48 aufgeführt.

Tabelle 47: Relevante technische Angaben der Fräsmaschine

Arbeitsbereich	
Schlittenlänge längs (X)	350 mm
Schlittenlänge quer (Y)	250 mm
Schlittenweg senkrecht (Z)	300 mm
Abstand Spindel­nase bis Tischoberfläche	Min. 120 mm, max. 420 mm
Frästisch	
Aufspannfläche (L x B)	520 mm x 300 mm
Frässpindel	
Werkzeugaufnahme nach DIN ISO 69871-A	SK 30
Werkzeugmagazin	
Wechsler nach S-Arm-Prinzip mit Zufallsverwaltung	
Anzahl Werkzeugplätze	20 Stück
Werkzeugwechselzeit direkt	2,5 s (vgl. Messung in Kapitel 5.2.2.4)
Max. Werkzeugdurchmesser	63 mm
Max. Werkzeugdurchmesser mit Leerplatz	80 mm
Max. Werkzeuglänge	200 mm
Max. Werkzeuggewicht	5 kg
Max. Bestückungsgewicht des Werkzeugmagazins	60 kg

Tabelle 48: Allgemeine technische Angaben zur Werkzeugmaschine

Arbeitsbereich	
Schlittenlänge längs (X)	350 mm
Schlittenlänge quer (Y)	250 mm
Schlittenweg senkrecht (Z)	300 mm
Abstand Spindel­nase bis Tischoberfläche	Min. 120 mm, max. 420 mm
Frästisch	
Gusstisch geschliffen	

Aufspannfläche (L x B)	520 mm x 300 mm
Höhe der Tischoberfläche über den Boden	900 mm
Max. Tischbelastung	100 kg
Anzahl der T-Nuten	5
Größe der T-Nuten nach DIN 650	12 mm
Abstand der T-Nuten	45 mm
Frässpindel	
Drehzahlbereich – Direktantrieb (Drehstrom-Asynchronmotor)	0 – 10000 min ⁻¹
Drehmoment (100/60 % ED)	33 Nm/41 Nm
Leistung (100/60 % ED)	7 kW/8,5 kW
Werkzeugaufnahme nach DIN ISO 69871-A	SK 30
Anzugsbolzen nach DIN ISO 69872 (ähnl. 7388/2)	M12, Typ A
Werkzeughalter gewuchtet nach DIN ISO 1940 bei 10000 min ⁻¹	G2,5
Werkzeugmagazin	
Wechsler nach S-Arm-Prinzip mit Zufallsverwaltung	
Anzahl Werkzeugplätze	20 Stück
Werkzeugwechselzeit direkt	2,5 s
Max. Werkzeugdurchmesser	63 mm
Max. Werkzeugdurchmesser mit Leerplatz	80 mm
Max. Werkzeuglänge	200 mm
Max. Werkzeuggewicht	5 kg
Einzugskraft	1500 N
Max. Bestückungsgewicht Werkzeugmagazin	60 kg
Kühlmitteleinrichtung	
Zuleitung an der Frässpindel über 3 Düsen	
Standardbehälterinhalt	140 l
Förderdruck	3,5 bar (3,5 x 10 ⁵ Pa)
Fördermenge 3,5 bar/1 bar	15 bar/ 65 bar
Pneumatik	
Versorgungsdruck	6 bar
Anschlussleitungsdurchmesser	10 mm
Versorgungsmenge	50 l/min
Schmiersystem	

Hauptspindellager	Lebensdauer-Fettschmierung
Führungen	Automatische Ölzentralschmierung
Vorschubspindel	
Lackierung	
Hellgrau	RAL 7040
Rot	RAL 3020
Schwarz	RAL 9004
Elektrischer Anschluss	
Spannungsversorgung	3 V/PE 400~
Max. Spannungsschwankung	+ 10 %/- 10 %
Frequenz	50 Hz/ 60 Hz
Anschlusswerte der Maschine	9 kVA
Max. Vorsicherung für die Maschine	20 A gG
Erforderliche Kurzschlussleitung	700 kVA
Betriebsbedingungen	+ 10 °C bis +35 °C
Schalldruckpegel	
Gemittelter Schalldruckpegel	78 db(A)
Abmessungen/Gewicht	
Gesamthöhe	2200 mm
Aufstellfläche B x T (ohne Späne-Förderer)	1600 mm x 1710 mm
Gesamtgewicht der Maschine (ohne Peripherie und Kühlmittel)	1970 kg
Kühlmittelbehälter Standard (leer)	60 kg

A2.5 Pseudocode genetischer Algorithmus

Genetischer Algorithmus (GA):

```

do initialisiere zufällig  $pop_{wp}(t)$ 
    Errechne Fitness  $K(i,t)$ 
    while Stoppkriterium = false do
        Selektiere  $pop_{wp}(t)$  aus  $pop_{wp}(t - 1)$ 
        Rekombiniere  $\overline{pop_{wp}}$  aus  $pop_{wp}(t)$ 
        Mutiere  $\overline{pop_{wp}}(t)$  zufällig
        Füge  $pop_{wp}(t)$  und  $\overline{pop_{wp}}(t)$  zusammen zu  $\overline{pop_{wp}'}(t)$ 
        Errechne Fitness  $K(i,t)(\overline{pop_{wp}'}(t))$ 
        Selektiere  $pop_{wp}^*(t)$ 
    end
end

```

Pseudocode 4: Genetischer Algorithmus (vgl. [LKM+99])

A2.6 Startbelegungen der Werkzeugpositionierung

Die Tabelle 49 zeigt die Startmagazinbelegung für die Werkzeugpositionierung der 215 Durchläufe des Suchverfahrens mittels MWZW und Metaheuristik aus Kapitel 5.2 und 6.3.2. Tabelle 50 zeigt die vorgeschlagenen Startbelegungen des Werkzeugmagazins durch die Planer (natürliche Personen). Von der Umfrage waren $n = 67$ Rückläufer zu verzeichnen.

Tabelle 49: Ergebnisse für die Startbelegung der Werkzeugmagazinbestückung unter Nutzung des MWZW

n = 215	Werkzeugmagazinplatzindex (1 bis 20), 0 bedeutet "nicht belegt" bzw. "durch übergroßes Werkzeug belegt", Nur das Nummerelement ohne "T" ist jeweils angegeben																			
Fitness/Wechselzeit [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
231,856	68	20	10	4	72	5	22	150	0	59	169	67	35	0	150	0	18	19	149	15
225,4885	35	93	72	169	59	67	10	29	0	21	6	200	0	0	68	18	149	35	5	19
214,41	5	35	18	200	0	0	59	19	4	149	93	21	68	22	67	7	2	15	169	72
219,756	169	19	93	22	20	149	2	10	72	68	67	21	29	0	3	0	0	59	5	4
227,1565	59	67	35	22	7	18	3	0	2	169	20	19	149	4	6	68	15	3	0	72
211,6415	68	72	19	35	5	4	22	18	10	20	150	0	0	0	7	2	59	169	67	93
213,219	18	59	68	7	15	3	0	149	0	35	10	22	20	169	93	72	5	4	2	67
220,7895	59	93	7	67	2	200	0	0	169	18	59	15	72	19	68	4	149	22	20	10
210,488	150	0	15	59	35	67	4	10	19	20	22	93	2	72	149	169	7	21	5	6
233,137	18	93	2	1	67	68	19	72	22	5	20	200	0	0	6	10	150	0	169	21
216,998	68	15	22	59	35	200	0	0	72	149	6	5	4	169	2	10	18	19	20	93
226,419	4	169	200	0	0	2	6	59	67	7	18	2	68	10	20	93	5	19	149	59
208,69	10	18	68	6	72	149	21	200	0	0	93	4	35	59	20	67	7	2	169	
211,6915	35	67	2	7	15	18	72	150	0	0	149	22	93	68	6	169	59	19	4	20
221,76	59	4	19	29	0	0	2	72	18	67	0	93	169	68	22	35	10	5	6	20
222,4975	68	15	67	149	169	2	21	19	22	4	20	200	0	0	35	59	93	18	7	10
209,337	149	169	18	7	200	0	0	6	67	2	68	20	59	93	4	10	19	5	72	22
223,2745	169	15	59	35	20	4	2	7	68	18	19	149	93	22	6	10	3	0	3	0
215,3805	59	169	10	93	67	22	6	21	68	149	19	200	0	0	2	4	35	20	5	7
226,0055	23	150	0	21	200	0	0	10	59	2	35	72	20	18	169	149	67	93	4	7
212,765	15	169	5	67	10	2	35	72	59	19	6	200	0	0	93	149	68	22	18	7
220,556	72	15	5	68	7	6	67	59	35	200	0	0	10	93	19	7	4	22	18	2
221,617	169	93	18	149	200	0	0	72	20	21	4	5	59	35	19	15	2	10	6	67
229,564	7	5	35	0	150	0	18	68	20	59	0	22	93	0	19	149	67	2	4	10
227,7405	72	200	0	0	15	67	21	7	68	6	150	0	19	5	10	169	35	93	20	18
220,466	35	22	4	5	2	59	67	15	169	20	149	200	0	0	18	10	72	93	19	0
213,4155	59	169	35	10	19	5	21	67	20	18	68	7	149	150	0	200	0	0	22	93
213,412	18	10	2	35	200	0	0	68	19	72	93	149	169	20	59	21	6	15	7	67
230,2385	2	59	169	68	35	18	72	150	0	21	7	10	4	19	20	5	0	29	0	93
208,9735	149	20	19	10	93	59	35	5	2	4	7	15	150	0	6	18	67	72	169	68
207,589	15	6	200	0	0	5	18	4	7	20	93	19	35	10	149	59	67	169	2	72
228,36	19	0	22	93	7	67	2	6	72	20	200	0	0	4	0	35	59	149	68	5
213,598	18	4	4	35	6	72	2	149	200	0	0	10	21	68	67	20	19	7	59	68
214,7335	169	21	5	10	59	200	0	0	7	72	6	149	68	2	67	4	93	22	20	18
224,0245	4	93	10	2	15	200	0	0	149	68	20	7	5	22	59	67	0	169	19	18
221,85	15	4	20	5	10	35	200	0	0	67	6	2	19	0	22	93	18	169	59	23
213,4395	93	18	5	4	19	21	149	20	200	0	0	2	67	6	10	7	72	35	59	22
226,083	15	150	0	23	67	2	149	150	0	21	20	93	59	5	35	169	68	7	4	19
210,9415	59	67	20	72	7	18	68	21	29	0	0	0	0	6	10	93	5	169	4	15
205,6755	10	200	0	0	15	2	72	18	68	149	169	5	4	19	93	67	20	59	21	7
219,172	200	0	0	7	93	149	169	72	2	67	59	68	35	59	18	10	4	19	15	5
220,426	22	67	18	149	93	2	15	7	169	59	19	35	5	20	6	68	200	0	0	4
210,528	35	5	4	169	10	93	19	22	20	2	68	67	149	59	6	21	200	0	0	72
221,617	18	15	169	68	149	7	4	93	6	20	59	200	0	0	35	19	21	2	5	67
217,9055	149	21	68	15	67	20	3	0	29	0	0	22	72	10	19	93	4	2	169	18
211,64	68	72	19	35	5	4	22	18	10	20	150	0	0	0	7	2	59	169	67	93
213,22	18	59	68	7	15	3	0	149	0	35	10	22	20	169	93	72	5	4	2	67
220,79	59	93	7	67	2	200	0	0	169	18	59	15	72	19	68	4	149	22	20	10
210,49	150	0	15	59	35	67	4	10	19	20	22	93	2	72	149	169	7	21	5	6
233,14	18	93	2	1	67	68	19	72	22	5	20	200	0	0	6	10	150	0	169	21
217	68	15	22	59	35	200	0	0	72	149	6	5	4	169	2	10	18	19	20	93
226,42	4	169	200	0	0	2	6	59	67	7	18	2	68	10	20	93	5	19	149	59
214	10	0	18	68	6	72	149	21	200	0	0	93	4	35	59	20	67	7	2	169
208,69	72	20	2	35	93	19	169	4	7	5	18	68	149	200	0	0	10	6	59	67
216,66	72	20	2	35	5	19	4	22	18	93	169	67	4	15	150	0	149	10	7	6
214,73	169	19	67	68	72	2	93	7	149	200	0	0	10	21	4	5	59	15	20	18
217,4	68	200	0	0	21	6	29	0	5	18	35	22	93	169	19	72	149	59	20	10
226,87	59	67	5	0	19	149	20	10	22	169	150	0	18	2	150	0	15	7	35	68
224,58	59	2	35	200	0	0	72	6	150	0	18	22	10	93	149	68	20	67	19	7
222,3	149	7	21	35	4	5	68	19	200	0	0	93	0	15	20	2	67	59	10	72
218,2	20	169	2	93	7	72	149	18	4	19	5	0	6	21	200	0	0	68	67	93
217,64	67	15	169	5	149	19	59	68	93	10	200	0	0	72	21	2	35	4	18	7
208,78	15	169	20	72	68	67	6	10	2	59	200	0	0	35	5	19	93	4	149	23
211,79	20	93	169	67	22	7	35	15	2	72	68	149	6	200	0	0	10	18	19	59
223,05	6	22	2	93	7	67	169	19	18	20	10	68	4	35	59	59	72	200	0	0
211,64	68	72	19	35	5	4	22	18	10	20	150	0	0	0	7	2	59	169	67	93
213,22	18	59	68	7	15	3	0	149	0	35	10	22	20	169	93	72	5	4	2	67
220,79	59	93	7	67	2	200	0	0	169	18	59	15	72	19	68	4	149	22	20	10
210,49	150	0	15	59	35	67	4	10	19	20	22	93	2	72	149	169	7	21	5	6
233,14	18	93	2	1	67	68	19	72	22	5	20	200	0	0	6	10	150	0	169	21
217	68	15	22	59	35	200	0	0	72	149	6	5	4	169	2	10	18	19	20	93
226,42	4	169	200	0	0	2	6	59	67	7	18	2	68	10	20	93	5	19	149	59
214	10	0	18	68	6	72	149	21	200	0	0	93	4	35	59	20	67	7	2	169
208,69	72	20	2	35	93	19	169	4	7	5	18	68	149	200	0	0	10	6	59	67
216,66	72	20	2	35	5	19	4	22	18	93	169	67	4	15	150	0	149	10	7	6
214,73	169	19	67	68	72	2	93	7	149	200	0	0	10	21	4	5	59	15	20	18
217,4	68	200	0	0	21	6	29	0	5	18	35	22	93	169	19	72	149	59	20	10
226,87	59	67	5	0	19	149	20	10	22	169	150	0	18	2	150	0	15	7	35	68
224,58	59	2	35	200	0	0														

217	68	15	22	59	35	200	0	0	72	149	6	5	4	169	2	10	18	19	20	93
226.42	4	169	200	0	0	2	6	59	67	7	18	2	68	10	20	93	5	19	149	59
214	10	0	18	68	6	72	149	21	200	0	0	93	4	35	59	20	67	7	2	169
208.69	72	20	2	35	93	19	169	4	7	5	18	68	149	200	0	0	10	6	59	67
206.06	72	20	2	35	5	19	4	22	18	93	169	67	59	15	150	0	149	10	7	6
214.73	169	19	67	68	72	2	93	7	149	200	0	0	10	21	4	5	59	15	20	18
217.4	68	200	0	0	21	6	29	0	5	18	35	22	93	169	19	72	149	59	20	10
226.87	59	67	5	0	19	149	20	10	22	169	150	0	18	2	150	0	15	7	35	68
224.58	59	2	35	200	0	0	72	6	150	0	18	22	10	93	149	68	20	67	19	7
222.3	149	7	21	35	4	5	68	19	200	0	0	93	0	15	20	2	67	59	10	72
218.2	20	169	2	93	7	72	149	10	4	149	5	0	6	21	200	0	0	68	59	67
217.64	67	15	169	5	149	19	59	68	93	10	200	0	0	72	21	2	35	4	18	7
208.78	15	169	20	72	68	67	6	10	2	59	200	0	0	35	5	19	93	4	149	23
211.79	20	93	169	67	22	7	35	15	2	72	68	149	6	200	0	0	10	18	19	59
223.05	6	22	2	93	7	67	169	19	18	20	10	68	4	35	59	59	72	200	0	0
215.19	93	169	149	68	10	6	72	2	200	0	0	7	4	0	20	59	21	67	19	22
215.79	200	0	0	2	149	6	59	20	10	35	169	93	67	5	18	68	15	4	21	7
223.31	19	93	22	150	0	200	0	0	10	2	59	20	72	15	68	35	5	4	169	18
236.19	68	4	19	15	0	169	59	35	10	0	29	0	5	7	1	3	0	18	72	2
219.63	10	22	169	20	19	59	5	7	150	0	15	149	68	21	6	150	0	35	18	93
220.32	20	59	21	29	0	15	7	169	68	2	18	4	22	5	93	19	67	0	6	10
214.41	18	10	68	4	7	21	200	0	0	67	59	20	2	35	6	149	5	93	72	19
214.51	68	15	2	93	149	59	72	22	5	19	67	35	4	7	18	10	200	0	0	20
214.19	169	22	35	67	4	72	2	19	59	18	7	149	20	200	0	0	68	10	93	15
205.42	72	68	4	19	35	67	20	7	59	10	15	150	0	169	6	2	22	149	5	93
225.77	169	67	72	10	4	7	2	20	5	29	0	3	0	59	93	68	22	21	149	18
212.79	67	72	2	10	7	200	0	0	15	19	35	18	169	5	21	93	59	149	22	20
221.57	59	0	93	72	15	149	7	169	2	35	21	200	0	0	5	4	18	10	68	19
227.2	93	149	35	19	72	2	7	4	10	20	59	29	0	29	0	21	10	67	169	22
215.38	68	18	10	2	67	7	169	6	93	59	200	0	0	20	35	5	21	19	4	149
229.01	22	1	29	0	18	20	59	35	6	2	200	0	0	0	149	68	67	93	19	72
210.31	93	18	2	0	3	0	20	59	19	67	6	35	5	68	7	10	149	72	22	169
223.79	67	15	200	0	0	22	20	4	93	35	6	19	5	59	169	10	149	0	18	2
223.38	149	200	0	0	93	22	19	35	72	2	0	6	7	10	4	5	59	20	67	169
214.64	7	15	67	59	18	4	10	20	68	21	200	0	0	0	19	149	169	72	93	2
211.64	68	72	19	35	5	4	22	18	10	20	150	0	0	0	7	2	59	169	67	93
213.22	18	59	68	7	15	3	0	149	0	35	10	22	20	169	93	72	5	4	2	67
220.79	59	93	7	67	2	200	0	0	169	18	59	15	72	19	68	4	149	22	20	10
210.49	150	0	15	59	35	67	4	10	19	20	22	93	2	72	149	169	7	21	5	6
233.14	18	93	2	1	67	68	19	72	22	5	20	200	0	0	6	10	150	0	169	21
217	68	15	22	59	35	200	0	0	72	149	6	5	4	169	2	10	18	19	20	93
226.42	4	169	200	0	0	2	6	59	67	7	18	2	68	10	20	93	5	19	149	59
214	10	0	18	68	6	72	149	21	200	0	0	93	4	35	59	20	67	7	2	169
208.69	72	20	2	35	93	19	169	4	7	5	18	68	149	200	0	0	10	6	59	67
206.06	72	20	2	35	5	19	4	22	18	93	169	67	59	15	150	0	149	10	7	6
214.73	169	19	67	68	72	2	93	7	149	200	0	0	10	21	4	5	59	15	20	18
217.4	68	200	0	0	21	6	29	0	5	18	35	22	93	169	19	72	149	59	20	10
226.87	59	67	5	0	19	149	20	10	22	169	150	0	18	2	150	0	15	7	35	68
224.58	59	2	35	200	0	0	72	6	150	0	18	22	10	93	149	68	20	67	19	7
222.3	149	7	21	35	4	5	68	19	200	0	0	93	0	15	20	2	67	59	10	72

218.2	20	169	2	93	7	72	149	10	4	19	5	0	6	21	200	0	0	68	59	67
217.64	67	15	169	5	149	19	59	68	93	10	200	0	0	72	21	2	35	4	18	7
208.78	15	169	20	72	68	67	6	10	2	59	200	0	0	35	5	19	93	4	149	23
211.79	20	93	169	67	22	7	35	15	2	72	68	149	6	200	0	0	10	18	19	59
223.05	6	22	2	93	7	67	169	19	18	20	10	68	4	35	59	59	72	200	0	0
215.19	93	169	149	68	10	6	72	2	200	0	0	7	4	0	20	59	21	67	19	22
215.79	200	0	0	2	149	6	59	20	10	35	169	93	67	5	18	68	15	4	21	7
223.31	19	93	22	150	0	200	0	0	10	2	59	20	72	15	68	35	5	4	169	18
236.19	68	4	19	15	0	169	59	35	10	0	29	0	5	7	1	3	0	18	72	2
219.63	10	22	169	20	19	59	5	7	150	0	15	149	68	21	6	150	0	35	18	93
220.32	20	59	21	29	0	15	7	169	68	2	18	4	22	5	93	19	67	0	6	10
214.41	18	10	68	4	7	21	200	0	0	67	59	20	2	35	6	149	5	93	72	19
214.51	68	15	2	93	149	59	72	22	5	19	67	35	4	7	18	10	200	0	0	20
214.19	169	22	35	67	4	72	2	19	59	18	7	149	20	200	0	0	68	10	93	15
205.42	72	68	4	19	35	67	20	7	59	10	15	150	0	169	6	2	22	149	5	93
211.64	68	72	19	35	5	4	22	18	10	20	150	0	0	7	2	59	169	67	93	2
213.22	18	59	68	7	15	3	0	149	0	35	10	22	20	169	93	72	5	4	2	67
220.79	59	93	7	67	2	200	0	0	169	18	59	15	72	19	68	4	149	22	20	10
210.49	150	0	15	59	35	67	4	10	19	20	22	93	2	72	149	169	7	21	5	6
233.14	18	93	2	1	67	68	19	72	22	5	20	200	0	0	6	10	150	0	169	21
217	68	15	22	59	35	200	0	0	72	149	6	5	4	169	2	10	18	19	20	93
226.42	4	169	200	0	0	2	6	59	67	7	18	2	68	10	20	93	5	19	149	59
214	10	0	18	68	6	72	149	21	200	0	0	93	4	35	59	20	67	7	2	169
208.69	72	20	2	35	93	19	169	4	7	5	18	68	149	200	0	0	10	6	59	67
206.06	72	20	2	35	5	19	4	22	18	93	169	67	59	15	150	0	149	10	7	6
214.73	169	19	67	68	72	2	93	7	149	200	0	0	10	21	4	5	59	15	20	18
217.4	68	200	0	0	21	6	29	0	5	18	35	22	93	169	19	72	149	59	20	10
226.87	59	67	5	0	19	149	20	10	22	169	150	0	18	2	150	0	15	7	35	68
224.58	59	2	35	200	0	0	72	6	150	0	18	22	10	93	149	68	20	67	19	7
222.3	149	7	21	35	4	5	68	19	200	0	0	93	0	15	20	2	67	59	10	72

Tabelle 50: Ergebnisse für die Werkzeugwechselzeit und die Startbelegung der Werkzeugmagazinbestückung durch befragte Personen

n = 67	Werkzeugmagazinplatzindex (1 bis 20), 0 bedeutet "nicht belegt" bzw. "durch übergroßes Werkzeug belegt", Nur das Nummerelement ohne "T" ist jeweils angegeben																			
Fitness/Wechselzeit [s]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
301,663	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	149	72	150	0
262,578	15	169	93	22	169	200	0	0	23	19	4	5	35	59	67	68	149	72	150	0
346,9525	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	149	72	19
252,477	35	59	67	150	0	1	2	3	0	15	169	93	200	0	0	29	0	23	19	4
362,3	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	5	4	35	59	68	67	149	72	0
301,66	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	149	150	0
317,49	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	35	5	4	35	59	68	67	150	0	0
352,8	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	200	0	0
310,56	15	169	93	22	200	0	0	29	0	3	0	23	19	4	5	35	59	67	68	72
299,12	15	169	93	22	200	0	0	29	0	68	72	23	19	4	5	35	59	67	3	0
338,41	15	169	93	22	200	0	0	29	0	3	0	6	10	20	35	59	1	21	7	2
286,69	15	169	93	22	200	0	0	29	0	18	2	7	35	20	10	6	3	0	1	4
341,65	15	169	93	22	200	0	0	29	0	1	2	3	0	6	10	20	35	59	21	7
211,73	15	169	93	22	200	0	0	29	0	150	0	4	5	3	3	0	6	10	20	35
233,67	15	169	93	22	200	0	0	150	0	29	0	4	5	3	0	6	10	20	35	59
312,03	15	169	93	22	200	0	0	29	0	21	7	4	5	3	0	6	10	20	35	59
237,55	15	169	93	22	200	0	0	3	0	150	0	4	5	29	0	6	10	20	35	59
302,31	169	15	22	93	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	149	72	150	0
350,83	200	0	0	22	15	169	93	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	149	72	19
562,46	15	169	93	22	23	19	4	5	35	59	67	68	149	72	1	2	6	10	20	21
489,00	200	0	0	22	23	19	4	5	35	59	67	68	149	72	1	2	6	10	20	21
282,52	200	0	0	3	0	150	0	5	35	59	67	68	149	72	1	2	6	10	20	21
296,75	3	0	200	0	0	19	4	5	35	59	67	68	149	72	1	2	29	0	150	0
298,69	200	0	0	3	0	19	4	5	35	59	67	68	149	72	1	2	29	0	150	0
362,3	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	5	4	35	59	68	67	149	72	0
301,66	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	149	150	0
318,14	15	169	22	93	200	0	0	29	0	23	35	5	4	35	19	68	67	150	0	0
351,61	15	169	93	22	29	0	200	0	0	23	19	4	5	35	59	67	68	200	0	0
310,56	93	169	15	22	200	0	0	3	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	72
299,77	15	22	93	169	200	0	0	29	0	68	72	23	19	4	5	35	59	67	3	0
338,41	15	169	93	22	200	0	0	29	0	3	0	6	10	20	35	59	1	21	7	2
289,83	15	169	93	22	200	0	0	29	0	3	0	7	35	20	10	6	18	2	1	4
341,65	15	169	93	22	200	0	0	29	0	1	2	3	0	6	10	20	35	59	21	7
233,67	15	169	93	22	200	0	0	150	0	29	0	4	5	3	0	6	10	20	35	59
234,32	22	169	93	15	200	0	0	150	0	29	0	4	5	3	0	6	10	20	35	59
312,68	15	22	93	169	200	0	0	29	0	21	4	7	5	3	0	6	10	20	35	59
238,84	15	169	93	22	200	0	0	3	0	150	0	5	4	29	0	10	6	20	35	59
302,31	169	15	22	93	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	149	72	150	0
350,83	200	0	0	22	15	169	93	29	0	23	19	4	5	35	59	67	68	72	149	19
563,75	15	169	93	22	23	4	19	35	5	59	67	68	149	72	1	2	6	10	20	21
487,21	22	23	19	200	0	0	4	5	35	59	67	68	149	72	1	2	6	10	20	21
277,34	35	59	67	3	0	150	0	5	200	0	0	68	149	72	1	2	6	10	20	21
297,39	3	0	200	0	0	19	4	5	35	59	67	149	68	72	1	2	29	0	150	0
300,31	200	0	0	3	0	19	4	5	35	59	149	67	68	72	1	2	29	0	150	0
401,73	15	169	93	22	200	0	0	29	0	23	19	5	4	35	59	68	67	149	72	1
301,66	169	15	93	22	200	0	0	29	0	23	19	4	5	35	59	67	150	0	68	149
375,51	15	169	22	93	200	0	0	29	0	23	35	5	4	35	19	150	0	67	68	1
352,58	15	169	93	22	29	0	200	0	0	23	19	4	5	35	59	200	0	0	67	68
311,21	93	169	15	22	200	0	0	3	0	29	0	23	19	4	35	5	59	67	68	72
301,06	15	22	93	169	200	0	0	29	0	68	72	23	19	5	35	4	59	67	3	0
339,06	15	169	93	22	200	0	0	29	0	3	0	6	35	20	10	59	1	21	7	2
312,34	15	169	93	22	200	0	0	29	0	3	0	20	35	7	10	18	6	2	1	4
344,23	15	169	93	22	200	0	0	29	0	1	2	3	0	20	10	6	35	59	21	7
235,61	15	169	93	22	200	0	0	150	0	29	0	5	4	6	10	3	0	20	35	59
234,32	22	169	93	15	200	0	0	150	0	29	0	4	5	3	0	6	10	35	20	59
312,68	15	22	93	169	200	0	0	29	0	21	4	7	5	3	0	6	10	20	35	59
239,49	15	200	0	0	169	93	22	150	0	3	0	5	4	29	0	10	6	20	35	59
305,6	169	15	22	93	200	0	0	29	0	23	4	19	35	5	59	67	149	72	150	0
345,57	200	0	0	22	15	93	169	29	0	19	23	4	5	35	59	67	68	72	149	19
562,78	15	169	93	22	23	19	4	5	35	59	68	67	149	72	1	2	6	10	20	21
488,35	22	23	19	200	0	0	4	5	35	59	67	149	68	72	1	2	6	10	20	21
279,28	35	59	67	3	0	150	0	5	200	0	0	68	149	1	2	72	6	10	20	21
297,39	3	0	200	0	0	19	4	5	35	59	67	149	68	72	1	2	29	0	150	0
302,25	200	0	0	3	0	19	4	5	35	59	149	67	68	72	1	29	0	2	150	0
579,84	15	169	93	22	23	19	4	5	35	59	68	67	149	72	1	5	6	20	21	30
563,43	15	169	93	22	23	19	4	5	35	59	68	67	149	72	2	1	10	6	20	21
568,73	15	169	93	22	23	19	4	5	35	59	68	67	149	72	6	1	6	10	20	21

A3 Nachtrag und Ergänzung zur Onlineschnittstelle

A3.1 Kollaborations- und Kooperationsysteme

Im Sinne der Arbeitsunterstützung bestehen als Kollaborations- und Kooperationsysteme bereits erste Ansätze: *Alem* und *Huang* (vgl. [AlHu11]) stellen unter der Annahme, dass neue Werker zu Beginn ihrer Arbeitstätigkeiten²³⁴ Unterstützung benötigen, einen *remote-collaboration*-Ansatz vor. Vom Einsatz der *remote-collaboration* sind überwiegend Wartungsarbeiten betroffen, bei denen der Werker unter Fernanleitung Arbeitsschritte an physischen Objekten durchführt. Dieser Ansatz ist ferner unter dem Begriff *remote guiding* einzuordnen. Bestehende Ansätze im Bereich des *remote guiding* sind laut *Alem* und *Huang* (vgl. [AlHu11]) für den industriellen Einsatz oder z. B. im Bergbau begrenzt einsetzbar. Da es sich hierbei um Desktopanwendungen handelt, sind als erweiterte Lösung mobile Kollaborationssysteme entwickelt worden: *mobile-remote-collaboration-systems*. Es handelt sich hierbei um tragbare Computer und zugehörige Anzeigeräte, die die Anforderungen an einfache Bedienbarkeit und Widerstand gegen verschiedene Umwelteinflüsse (Feuchtigkeit oder mechanische Stöße) erfüllen. Zudem dürfen im Umgang mit den Geräten die Mobilität und Beweglichkeit des Kollaborationsakteurs nicht beeinträchtigt werden. Insbesondere Wartungsarbeiten als konkreter Anwendungsfall in anspruchsvoller Arbeitsumgebung weisen einen wachsenden Bedarf nach *remote guidance*-Systemen auf, die eine effektive Just-in-Time-Unterstützung bieten. Das *mobile remote collaboration system* besteht aus einer Kamera und zwei Bildschirmen, die jeweils an der PSA²³⁵ (hier z. B. Schutzhelm) befestigt werden. Der Werker kann die angezeigten Unterstützungsmaßnahmen und Anleitungen im oberen Sichtfeld unmittelbar einsehen. Somit werden Hilfestellen und der Arbeitsbereich angezeigt, an dem sich orientiert werden kann. Die Kamera sendet den sichtbaren Arbeitsbereich des Werkers an einen anderen Standort, wie z. B. eine Werkstatt, Büroarbeitsplätze usw., sodass weitere Personen miteinbezogen werden können. Der Helfer an dem anderen Standort kann zusätzlich Handgesten durchführen, die dem Werker an den Einsatzort übermittelt werden, sodass diese direkt an dem physikalischen Objekt durchgeführt werden können (vgl. [AlHu11]).

Kritikpunkt an diesem Ansatz ist die zwingende Echtzeitübertragung zwischen Helfer und Werker. Eine Lösung wie die Übertragung von *Augmented Reality* könnte sich ebenfalls nützlich erweisen, sodass das Übereinanderlegen von Kamerabildern zwischen Helfer und Werker als *virtual screen* überflüssig wird. Die beschriebene Lösung zum *mobile remote collaboration systems* könnte einen sinnvollen Einsatz im Rahmen von Rettungsarbeiten finden, die noch von Menschenhand durchgeführt werden.

²³⁴ Mitunter ist diese Arbeit auf körperliche Tätigkeiten bezogen.

²³⁵ PSA steht für **P**ersönliche **S**chutz**A**usrüstung.

A3.2 Kollaboration und Einordnung von MSSP

E-Kollaboration²³⁶ kann durch die offensichtlichen allgemeinen Funktionsinhalte Kommunikation, Koordination, Kooperation und Kollaboration zum Teil der Informations- und Wissensarbeit zugeordnet werden, was durch digitale Arbeitsplätze (*engl. digital workplaces*) unterstützt wird (vgl. [Mar14]). Als Begriffslandkarte bietet *Martensen* nach *Back et al.* (vgl. [BGT12] S. 7) eine Übersicht, die in Abbildung 87 dargestellt ist. Eine Einordnung der einzelnen Begrifflichkeiten zur kollaborativen und kooperativen Arbeit geht daraus hervor. Dabei steht der Bereich *Social Software*²³⁷/*Social Media* im Fokus, was nach der Autorenansicht von *Martensen* und *Back et al.* (vgl. [Mar14], [BGT12]) als *Groupware/CSCW*²³⁸ zu bezeichnen ist. Eine Beispielpattform, die dem Bereich *Social Software* zuzuordnen ist, wäre im kommerziellen Bereich MSSP (vgl. Abbildung 87).

Der Begriff *Social Media* kann synonym zu *Social Software* genutzt werden, auch wenn streng genommen das Wort *Media* eine weitere Fassung beinhalten würde. In der Literatur gibt es noch weitere Definitionen, die *Social Software* aus verschiedenen Kontexten und Blickwinkeln zu betrachten. Dazu zählen ferner die Definitionen von *Schmidt*, *Hippner* und *Coates* (vgl. [Sch06] S. 38, [Hip06] S. 7 und [Coa05-ol]), die für die vorliegende Arbeit keinen weiteren Mehrwert für das Verständnis mit sich bringen und nur aus Gründen der Vollständigkeit genannt sind.

²³⁶ E-Kollaboration ist die Zusammenarbeit an einer gemeinsamen Aufgabe (task) ohne direkte Interaktion eines physikalisch anwesenden Individuums (face-to-face) oder Mitglieder eines „virtuellen Teams“ unter Verwendung von Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT, Information and Communication Technologies) (vgl. [BGT09]). Mit „virtuelles Team“ ist hierbei eine Gruppe von Menschen gemeint, die mittels unabhängiger Aufgaben miteinander interagieren und dabei von einem gemeinsamen Ziel geleitet werden. Es kann unabhängig von Raum, Zeit und organisatorischer Beschränkung arbeiten und ist dabei durch ein Netz von Kommunikationstechnologien verbunden (vgl. [BGT09]).

²³⁷ *Social Software* ist eine Software, die die Kooperation und Kommunikation zwischen zwei Individuen unterstützt. Dabei ist die Eigenschaft einer solchen Software nicht sozial als solches zu verstehen, sondern es wird lediglich eine Möglichkeit geboten, mit anderen Individuen in Kontakt zu treten (vgl. [Mar14] S. 37, [Ric10]).

²³⁸ CSCW steht für *Computer Supported Cooperative Work*, zu Deutsch „rechnergestützte Gruppenarbeit“, und umfasst einen Bereich von Forschungsprogrammen, die in den 1980ern zum Teil große Beachtung in der Wirtschaftsinformatik sowie anderen Disziplinen fanden (vgl. [Mar14]). Dabei geht es um das „Verstehen von Wesensmerkmalen und Eigenschaften kooperativen Arbeitens mit dem Ziel, adäquate informationstechnologische Konzepte zu entwerfen, die kooperatives Arbeiten im Team sinnvoll unterstützen“ (vgl. [FDN+12] S. 190).

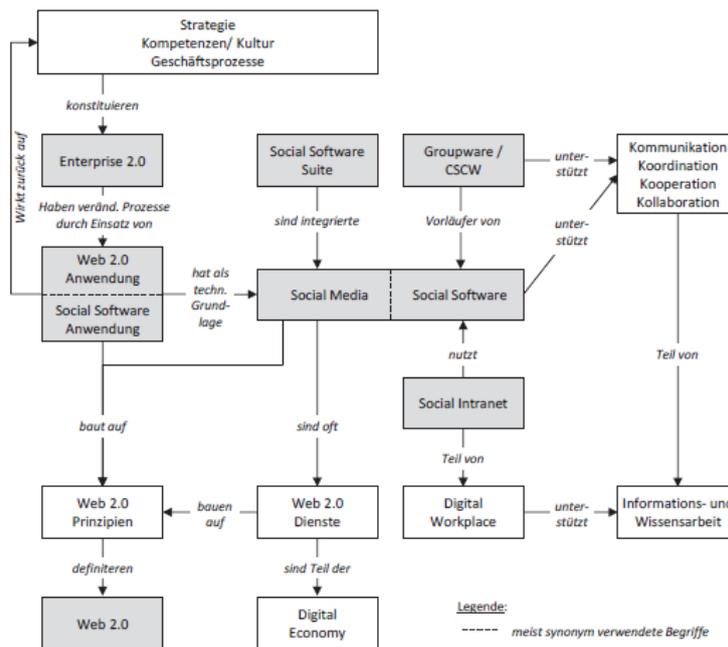


Abbildung 87: Begriffslandkarte des Themenkomplexes *Social Software* nach Back et al. (vgl. [BGT12]), in Martens (vgl. [Mar14])

Streng genommen müssen die Begriffe *Web 2.0*²³⁹ und *Social Media*, die im allgemeinen Sprachgebrauch inflationär genutzt werden, dahingehend abgegrenzt werden, dass eine Trennung im Gebrauch des öffentlichen Internets und im Unternehmenskontext ermöglicht wird. Richter et al. (vgl. [RRB11] S. 90) nutzen dazu die Unterscheidung zwischen *Web 2.0* versus *Enterprise 2.0*²⁴⁰ sowie *Social Media* versus *Social Software* (bzw., wie in Abbildung 87 gezeigt, *Social Intranet*) (vgl. [Mar14] S. 41). Für *Enterprise 2.0* wird auch der Begriff *Corporate Web 2.0* genutzt (vgl. [StTo10]). Im Bezug zu Kollaboration und Kooperation haben diese genannten Technologien, die sich hinter den definierten und abgegrenzten Begriffen verbergen, dazu beigetragen, die Zusammenarbeit im unternehmerischen Kontext zu beeinflussen:

Im Bereichen der rechnergestützten Gruppenarbeit wird forschungstechnisch untersucht, wie Individuen einer oder mehrerer Organisationen zusammenarbeiten und welche Unterstützung dabei die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) liefern kann (vgl. [Mar14], [KoRi09]). *Groupware* (vgl. Abbildung 87) fasst in diesem Kontext die Anwendungen zusammen, die eine Unterstützung durch IKT umsetzen und die kollaborative Arbeit von interdisziplinären Gruppen erleichtert. Dazu zählen Dienste wie E-Mails, Chats, Kalender, Adressbücher u.v.m.

²³⁹ *Web 2.0* umfasst begrifflich den Strukturwandel im Internet, der durch den Informationsaustausch und die Interaktion zwischen Nutzern und nicht nur durch statische Webseiten ausgemacht wird (vgl. [O'Rei07]). Statische Webseiten lassen Inhaltsveränderungen oder Ergänzungen durch Dritte nicht zu (vgl. [StJä08a], [StJä08b]).

²⁴⁰ „*Enterprise 2.0* is the use of emergent social software platforms within companies, or between companies and their partners or customers” (vgl. [McA16-ol]).

Von einem *integrierten E-Kollaborationssystem* (vgl. [MaKh99] S. 245) wird gesprochen, wenn allgemein Unterstützung für mehr als

- einen Modus (synchrone und asynchrone Bearbeitung von Aufgaben),
- ein Medium (z.B. Texte, Grafiken, Audio, Video, Shared Whiteboard),
- eine Struktur

vorliegt.

Nach *Munkvold* und *Zigurs* (vgl. [MuZi05]) kann dieses integrierte E-Kollaborationssystem ferner in sieben Kategorien eingeteilt werden, die in Tabelle 51 aufgezeigt werden.

Tabelle 51: Kategorien der E-Kollaborationssysteme nach *Munkvold* und *Zigurs* (vgl. [MuZi05])

E-Kollaborationssystem	Inhalte, Werkzeuge und Produktbeispiele	
Collaborative Product Suites	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	E-Mail, Gruppenkalender, Diskussionsforen (Threads), Dokumentenverwaltung, Workflows Lotus Notes/Domino, MS Exchange, GroupWise
Collaborative Portals	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	Instant Messaging, Presence Awareness, Team Workplaces, People Finder, E-Meetings, Dokumentenverwaltung IBM Websphere portal, MSSP
Desktop Conferencing Systems	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	Instant Messaging/Chat, Audiokonferenz, Presence Awareness, Videokonferenz, Application Sharing, Shared Whiteboard, Polling, Voting, Aufzeichnen von Informationen aus dem Meeting MSN Messenger, Interwise, Centra 7, WebEx Meeting, MS Live Meeting, Virtual Room Videoconferencing System
Web-based Team/Project Rooms	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	Gruppenkalender, Kontakte, Notizen, Aufgaben, File Sharing, E-Mail, Char, Pinnwand, Projektmanagement, Dokumentenverwaltung, Diskussionsforen, Brainstorming, Voting, Time Sheets, Telegram, Evaluation, Scheduler TeamSpace, Document eRoom, ConferenceXP, Lotus Workplace Team Collaboration
Collaboration Peer-to-peer Systems	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	Instant Messaging/Chat, Presence Awareness, Diskussionsforen, File Sharing, Projektmanagement, Gruppenkalender, Group Outliner, Meeting Management Groove Virtual Office
Electronic Meeting Systems	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	Agenda, Brainstorming, Kategorisierung u. Organisation, Abstimmung & Priorisierung, Action Planning, Umfragen, Shared Whiteboard, Meeting Log, Chat GroupSystems, Facilitate.com, Meetingworks
E-Learning Systems	Technik/Anwendung: Produktbeispiele:	E-Mail, Instant Messaging, Presence Awareness, Kalender, Diskussionsforen, Archiv für Lernmaterialien, Kursverwaltung Blackboard, Centra 7, Aspen, Lotus Workplace Collaborative Learning, WebEx Training Center, Moodle

A3.3 Exkurs

Im Kontext des Web 2.0 gibt es nach *O'Reilly* sieben Prinzipien, von denen die nachfolgenden besondere Beachtung finden, da sie durch die onlinebasierte Benutzerschnittstelle sowie durch die Fremdlösung von MSSP erfüllt werden (vgl. [O'Rei05-ol], [O'Rei07]):

- *Das Internet wird zur Serviceplattform, sodass Anwendungen wie Projektmanagement, Terminplanung oder Text- und Bildbearbeitung im Internet gespeichert und verwaltet werden und somit die Grenzen lokaler Desktopanwendungen verlassen.*

Steuerung des Aufspannverfahrens und der Werkzeugmagazinbelegung beruht ebenfalls auf dem genannten Prinzip.

- *Harnessing Collective Intelligence: Anstelle der Betreiber von Webseiten sind es im Web 2.0 die Nutzer, die Inhalte einstellen und gemeinsam weiterentwickeln.* Die Aufspannpositionskoordinaten werden maschinell automatisiert auf Webseiten und Datenbanken dargestellt – der Nutzer kann allerdings das Seitenlayout nicht verändern.

- *End of the Software Release Cycle: Software stellt im Web 2.0 kein Produkt mehr dar, sondern eine Dienstleistung, die sich in ständiger Weiterentwicklung, also einem permanenten Beta-Stadium, befindet.*

Die MSSP-Lösung sowie die eigene Onlinelösung können jederzeit an Veränderungen angepasst werden und ruhen nicht in einem abgeschlossenen Systemzustand.

- *Lightway Programming Models: Daten lassen sich leicht über standardisierte Schnittstellen bereitstellen und neu zusammenfügen.*

In den erarbeiteten Anwendungsfällen handelt es sich um Schnittstellen zu Datenbanken und php-Schnittstellen.

- *Software above the Level of a Single Device: Inhalte des Web 2.0 sind plattform- und geräteunabhängig, sodass nicht nur ein stationärer PC, sondern auch mobile Endgeräte nutzbar sind.*

Die Weboberfläche (eigene Onlinelösung) sowie MSSP sind auf mobilen Endgeräten abrufbar.

Literaturverzeichnis

- [ABW+05] Altintas, Y.; Brecher, C.; Weck, M.; Witt, S.: Virtual Machine Tool. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 54/2, 2005, S. 115–138.
- [AGG03] Akturk, M. S.; Ghosh, J. B.; Gunes, E. D.: Scheduling with tool changes to minimize total completion time. A study of heuristics and their performance. In: Naval Research Logistics, 50/1, 2003, S. 15–30.
- [AHK11] Afifi, A. A.; Hayhurst, D. R.; Khan, W. A.: Non-productive tool path optimisation of multi-tool part programmes. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 55, 2011, Springer Verlag, London, S. 1007–1023.
- [Akt10] Akturk, M. S.: An exact tool allocation approach for CNC machines. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 112, 2010, S. 129–140.
- [AlEr98] Altintas, Y.; Erol, N. A.: Open Architecture Modular Tool Kit for Motion and Machining Process Control. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 47/1, 1998, S. 295–300.
- [AlHu11] Alem, L.; Huang, W.: Developing Mobile Remote Collaboration Systems for Industrial Use: Some Design Challenges. 13th IFIP TC 13 International Conference, Part IV: Proceedings of the 13th IFIP – Human-Computer-Interaction – INTERACT 2011; September 5-9, 2011, Lisbon, Portugal, S. 442–445.
- [AlTa01] Altumi, A. A.; Taboun, S. M.: Effect of tool sharing on the reliability of flexible manufacturing systems. In: Production Planning & Control, 12/3, 2001, S. 265–273.
- [AMR92] Amoako-Gyampah, K.; Meredith, J. R.; Raturi, A.: A comparison of tool management strategies and part selection rules for a flexible manufacturing system. In: International Journal of Production Research, 30/4, 1992, S. 733–748.
- [AnTr00] Anderl, R.; Trippner, D.: STEP STandard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2000.
- [ASK+08] Aggarwal, A.; Singh, H.; Kumar, P.; Singh, M.: Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. In: Journal of Materials Processing Technology, 205/1-3, 2008, S. 42–50.
- [AvAk96] Avci, S.; Akturk, M.: Tool magazine arrangement and operations sequencing on CNC machines. In: Computers & Operations Research, 23/11, 1996, S. 1069–1081.
- [AWF05] N. N.: Von der Arbeitsvorbereitung zum Produktivitätsmanagement. Erfahrungsbericht der AWF-Arbeitsgemeinschaft: Die Arbeitsvorbereitung im prozessorientierten Unternehmen. AWF-Arbeitsgemeinschaften für Vitale Unternehmensentwicklung, AWF-Selbstverlag, Eschborn, 2005.
- [AWF16-ol] N. N.: Rüstzeitmanagement, Unter: <http://www.awf.de/>, 1. November 2016.
- [AWS16-ol] N. N.: Fertigungstechniklexikon. Unter: <http://www.aws-ft.de/fertigungstechnik-lexikon/fertigungstechnik-no/nebenzeit/>, 22. November 2016.
- [AXH11] Abdul K. A.; Xu, X.; Hämmerle, E.: Virtual machine tools and virtual machining, A technological review. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27/3, 2011, S. 494–508.
- [Ayg16] Aygün, H.: Reihenfolgeoptimierung in Werkzeugmagazinen unter Berücksichtigung der NC-Befehlsreihenfolge. Bachelorthesis, Wirtschaftsinformatik, insb. CIM, Universität Paderborn, Paderborn, 2016.

- [BaNo03] Bahn, H.; Noh, S. H.: Characterization of Web Reference Behavior Revisited: Evidence for Dichotomized Cache Management. In: Kahng, H.-K. (Hrsg.): Information Networking, LNCS 2662. Springer, Berlin Heidelberg, New York, 2003, S. 1018–1027.
- [BaOz15] Baykasoğlu, A.; Ozsoydan, F. B.: An improved approach for determination of index positions on CNC magazines with cutting tool duplications by integrating shortest path algorithm. In: International Journal of Production Research, 54/3, 2015, S. 742–760.
- [BaOz16] Baykasoğlu, A.; Ozsoydan, F. B.: Minimizing tool switching and indexing times with tool duplications in automatic machines. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 68/1, 2016, S. 1775–1789.
- [Bar88] Bard, J. F.: A Heuristic for Minimizing the Number of Tool Switches on a Flexible Machine. In: IIE Transactions, 20/4, 1988, S. 382–391.
- [BGT09] Bouras, C.; Giannaka, E.; Tsiatsos, T.: e-Collaboration Concepts, Systems and Applications. In: Kock, N. F. (Hrsg.): E-collaboration. Concepts, methodologies, tools, and applications. Information Science Reference, IGI Global, Hershey, PA., USA 2009.
- [BGT12] Back, A.; Gronau, N.; Tochtermann, K.: Web 2.0 und social media in der Unternehmenspraxis. Grundlagen, Anwendungen und Methoden mit zahlreichen Fallstudien. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 2012.
- [BiAz06] Bilgin, S.; Azizoğlu, M.: Capacity and tool allocation problem in flexible manufacturing systems. In: Journal of the Operational Research Society, 57/6, 2006, S. 670–681.
- [BON14] Barbosa, J. A. G.; Osorio, J. M. A.; Nieto, E. C.: Simulation and verification of parametric numerical control programs using a virtual machine tool. In: Production Engineering, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014, 8, S. 407–413.
- [Brö08] Brökel, K.: Pro-ENGINEER. Effektive Produktentwicklung. Pearson Studium, Scientific tools, München, 2008.
- [BSK04] Buyurgan, N.; Saygin, C.; Kilic, S. E.: Tool allocation in flexible manufacturing systems with tool alternatives. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 20/4, 2004, S. 341–349.
- [Bun12] N. N.: IT-Sicherheitsniveau in kleinen und mittleren Unternehmen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, BMWi (Hrsg.). Unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/it-sicherheitsniveau-in-kleinen-mittleren-unternehmen.pdf?__blob=publicationFile&v=3, 31. August 2017, Berlin, 2012.
- [CGL99] Chu, Y. X.; Gou, J. B.; Li, Z. X.: Workpiece localization algorithms. Performance evaluation and reliability analysis. In: Journal of Manufacturing Systems, 18, 1999, S. 113–126.
- [CGT17-ol] N.N.: Vericut Modul. Maschinensimulation, Köln, 2017.
- [CLC+08] Cao, J.; Lai, X.; Cai, W.; Jin, S.; Lin, Z.: Workpiece Positioning Analyses. The Exact Solutions and a Quadratic Variation Approximation Using the Method of Moments. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130/62008, S. 61013.
- [Coa05-ol] Coates, T.: An addendum to a definition of Social Software. Unter: http://plasticbag.org/archives/2005/01/an_addendum_to_a_definition_of_social_software, 5. November 2016.
- [Cos16a-ol] N. N.: COSCOM Computer GmbH. Internetauftritt Referenzen. Unter: <https://www.coscom.de/referenzen-nutzen.html#coscom-referenzen-success-stories-ausder-praxis>, 31. August 2017.
- [Cut13-ol] N. N.: Cutviewer. CNC Simulation and Verification. Lamson Global and GRZ Software (Hrsg.) 2013. Unter: www.cutviewer.com, 2. November 2016.

- [Dan09] Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und –steuerung – Im Sommer keine Kirschpralinen?, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [DeBa05] Dereli, T.; Baykasoğlu, A.: OPPS-PRI 2.0. An open and optimized process planning system for prismatic parts to improve the performance of SMEs in the machining industry. In: International Journal of Production Research, 43/5, 2005, S. 1039–1087.
- [DeFi00] Dereli, T.; Filiz, İ. H.: Allocating optimal index positions on tool magazines using genetic algorithms. In: Robotics and Autonomous Systems, 33/2-3, 2000, S. 155–167.
- [DIN 66025-1] Deutsches Institut für Normung e. V.: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, Beuth Verlag, Berlin, 1983-01-00.
- [DIN 33400] Deutsches Institut für Normung e.V.: Gestalten von Arbeitssystemen nach arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen. Begriffe und allgemeine Leitsätze, Beuth Verlag, Berlin, 1983-10.²⁴¹
- [DiTs14] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: Praxis der Zerspantechnik – Verfahren, Werkzeuge, Berechnung, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [DLC+10-ol] Denkena, B.; Lorenzen, L.-E.; Charlin, F.; Dengler, B.: Quo vadis Arbeitsplanung? – Marktstudie zu den Entwicklungstrends von Arbeitsplanungssoftware, 2010. Unter: <http://www.refa-bw.de/media/251/yzvXO/>, 31. August 2017
- [DMC16-ol] N. N.: DMC V-Baureihe. DMC 635 V, DMC 835 V, DMC 1035 V – Leistungsdiagramme/Aufstellpläne/technische Daten. Vertikal-Fräszentren. Unter: www.dmgmori.com, 2. November 2016.
- [DMG16] N. N.: DMG MORI Virtual Machine – Einzigartige 1:1-Maschinensimulation. Unter: <http://de.dmgmori.com/blob/387044/9cc7581cd0549443051c7d8b8bfb97c1/ps1de15-virtual-machine-pdf-data.pdf>, 27. Oktober 2016.
- [DMG16a-ol] N. N.: DMG MORI Virtual Machine. Unter: <http://de.dmgmori.com/produkte/software/dmg-mori-virtual-machine#Intro>, 27. Oktober 2016.
- [DMU16-ol] N. N.: DMU/DMC duo Block – Universal Fräsmaschinen für 5-Seiten-/5-Achs-Bearbeitung. Unter: <http://de.dmgmori.com/produkte/fraesmaschinen/5-achs-universal-bearbeitungszentren/dmu-fd-duoblock/dmu-80-fd-duoblock#Downloads>, 30. August 2017.
- [DTR02] Dena, B.; Tracht, K.; Rehling, S.: Simulationsmodul für Maschinendynamik im Rahmen eines Fertigungssimulationssystems. In: wt Werkstatttechnik online, 05-2002, 2002, S. 223–224.
- [DuCo09] Duran, O.; Consalter, L. A.: Integrating PSO and CAM database for selecting cutting tools. International Conference on Computational Intelligence and Security, 11. – 14.12.2009. In: Corchado, E.; Abraham, A.; Pedrycz, W. (Hrsg.): HAIS 2008, LNAI 5271, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008 S. 265–272.
- [Dud16-ol] N. N.: Duden. “Kollision”. Unter: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Kollision>, 31. August 2017.
- [Dud96] Drosdowski, G.; Müller, W.; Scholze-Stubenrecht, W.; Wermke, M.: Duden, deutsches Universalwörterbuch – A–Z; auf der Grundlage der neuen amtlichen Rechtschreibregeln. Dudenverlag, Mannheim, 1996.
- [DVM16-ol] N. N.: DMG MORI Virtual Machine – DMG Powertools, DMG Virtual Machine 64, Software DMG MORI AG, Bielefeld/Pfronten, 2016. Unter: <http://de.dmgmori.com/produkte/software/dmg-mori-virtual-machine>, 5. Oktober 2016.²⁴²

²⁴¹ Die Norm wurde bereits zurückgezogen.

²⁴² Diese Referenz verweist auf die Software der vWZM. Informationen sind unter dem angegebenen Verweis gegeben.

- [EMCO17-ol] N. N.: Technische Daten Emcomill E350, Unter: <https://www.emco-world.com/de/produkte/industrie/fraesen/cat/27/d/2/p/1000236%2C27/pr/emcomill-e350.html>, 31. August 2017.
- [End16] Enders, N.: SharePoint 2016 für Anwender – Das umfassende Handbuch, Rheinwerk Computing, Bonn, 2016.
- [ErAl01] Erkorkmaz, K.; Altintas, Y.: High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41/9, 2001, S. 1323–1345.
- [Eur17-ol] N. N.: Eureka Virtual Machining – Simulationssoftware für CNC Maschinen und Roboter. Unter: <http://roboris-deutschland.de/uber-eureka/>, 10. April 2017.
- [Eve97] Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik – 3. Arbeitsvorbereitung, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997.
- [FaAr13] Fallah, M.; Arezoo, B.: Modelling and compensation of datum errors in five-axis machining. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B. In: Journal of Engineering Manufacture, 227/1, 2013, S. 21–31.
- [FDN+12] Fischer, J.; Dangelmaier, W.; Nastansky, L.; Suhl, L.: Bausteine der Wirtschaftsinformatik – Grundlagen und Anwendungen, E. Schmidt, Berlin, 5. Auflage, 2012.
- [FGH+08] Fischer, U.; Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Näher, F.; Oesterle, S.; Paetzold, H.; Stephan, A.: Tabellenbuch Metall, Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 44. Auflage, 2008.
- [FGH+11] Fischer, U.; Gomeringer, R.; Heinzler, M.; Kilgus, R.; Näher, F.; Oesterle, S.; Paetzold, H.; Stephan, A.: Tabellenbuch Metall, Verlag Europa-Lehrmittel Nourney Vollmer, Haan-Gruiten, 45. Auflage, 2011.
- [FiGa09] Fischer, J. W.; Gathmann, D.: Feature-based Machining – Einsatz wissensbasierter Methoden der Digitalen Fabrik zur Realisierung einer teilautomatisierten Fertigungsprozessplanung im Prototypenbau bei der BSH Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH, Digitale Fabrik, Fertigung, CAM. In: wt Werkstatttechnik online, 99/06-2009, 2009, S. 432–437.
- [FrKe84] Franz, J.; Kern, W.: Graphiksimulation im Dialog, Drehen und Fräsen, Carl Hanser Verlag, München, 1984.
- [FrPe08] Freire, M.; Pereira, M.: Encyclopedia of Internet Technologies and Applications – E-Collaboration Concepts, Systems, and Applications, IGI Global, Hershey, PA, USA, 2008.
- [FSE15] Francisco-Ortiz, de, O.; Sánchez-Reinoso, H. T.; Estrems-Amestoy, M.: Development of a Robust and Accurate Positioning System in Micromachining Based on CAMERA and LCD Screen. In: Procedia Engineering, 132, 2015, Elsevier Ltd, S. 895–902.
- [Gab16-ol] Wübbenhorst, K.: Gabler Wirtschaftslexikon – Die ganze Welt der Wirtschaft. Unter: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/>, 5. November 2016.
- [Gab88] N. N.: Gabler WirtschaftsLexikon. Gabler, 6 Bände, Wiesbaden, 11. u. 12. Auflage, 1988.
- [GePo10] Gendreau, M.; Potvin, J.-Y.: Handbook of metaheuristics, Band 146, Springer Verlag, New York, 2. Auflage, 2010.
- [Gho16a-ol] Ghosh, D.: A new genetic algorithm for the tool indexing problem. IIMA Working Papers. Unter: <https://web.iima.ac.in/assets/snippets/workingpaperpdf/15834390662016-03-17.pdf>, 17. Mai 2017.
- [Gho16-ol] Ghosh, D.: Allocating tools to index positions in tool magazines using tabu search. IIMA Working Papers. Unter: <https://web.iima.ac.in/assets/snippets/workingpaperpdf/20204235882016-02-06.pdf>, 19. Mai 2017.

- [GrFe07] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: *Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau* Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 22. Auflage, 2007.
- [Gri81] Griewank, A. O.: Generalized descent for global optimization. In: *Journal of Optimization Theory and Applications*, 34/1, 1981, S. 11–39.
- [GSS93] Gray, A. E.; Seidmann, A.; Stecke, K. E.: A Synthesis of Decision Models for Tool Management in Automated Manufacturing. In: *Management Science*, 39/5, 1993, S. 549–567.
- [GTS16-ol] N. N.: GARANT ToolScout – Zerspanhandbuch. Unter: <https://www.hoffmann-group.com/DE/de/hom/service/downloads/zerspanungshandbuch>, 5. November 2016.
- [Güb10] Gübeli, R.; Käser, H.; Klaus R.; Müller, T.: *Mikroprozessor-Hardware und Programmier-techniken – Technische Informatik II*, vdf Hochschulverlag an der ETH, Zürich, 2010.
- [Gur16-ol] N. N.: Gurobi for universities – Software Solver. Gurobi GmbH, Gurobi EMEA, Gurobi Optimization Inc., Bad Homburg, 2016. Unter: <http://www.gurobi.com/downloads/download-center>, 9. November 2016.²⁴³
- [HaYu09] Hanwu, H.; Yueming, W.: Web-based virtual operating of CNC milling machine tools. In: *Computers in Industry*, 60/9, 2009, S. 686–697.
- [Hei12-ol] Heimann, T.: Die Technologie-Trends der letzten 10 Jahre – Kategorie: Trend-Anatomie, IT-Trends-Blog. Unter: <https://www.de.capgemini.com/blog/it-trends-blog/2012/10/die-technologie-trends-der-letzten-10-jahre>, 10. November 2016.
- [Hip06] Hippner, H.: Bedeutung, Anwendungen und Einsatzpotenziale von Social Software. In: *HMD – Praxis der Wirtschaftsinformatik*, 43/6, 2006.
- [Hip16-ol] Hipschmann, R.: How SETI@home works – SETI@home – the Search of Extra-terrestrial Intelligence. Unter: http://seticlassic.ssl.berkeley.edu/about_seti/about_seti_at_home_1.html, 26. Oktober 2016.
- [Hof12] N. N.: *Garant ToolScout Zerspanungshandbuch – Bohren, Gewinde, Senken, Reiben, Sägen, Fräsen, Drehen, Spannen, Präzisionsschleifen*, Hoffmann Group, München, 2012.
- [INA17-ol] INA – Drives & Mechatronics GmbH & Co. KG: X-Y-Positioniersysteme auf Basis der Planarmotor-Technologie. Unter: www.idam.de, http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/idam_1/brochures/downloads_32/idam_planarmotoren_de_de.pdf 2017, 10. April 2017
- [IND17-ol] N. N.: VirtualLine – Die virtuelle Maschine von INDEX. Unter: https://www.indexwerke.de/fileadmin/user_upload/INDEX/VirtualLine/VirtualLine_dt.pdf, 10. April 2017
- [Int16-ol] N. N.: Intelitek – CNC Machine Control Software. Unter: http://www.intelitek.com/resources/pdf/35-1007-3200_DS_SW_CNCCBase_CNCMotion_Ver%20E.pdf, 10. April 2017
- [Int16a-ol] N. N.: Why OpenCL? Intel Developer Zone. Unter: https://software.intel.com/en-us/intel-openc!cid=sem43700011315533236&intel_term=openCL&gclid=CjwKEAjwy8bABRD5osXMovTHpmQSJACfZY0FOLfxh7sz3HGJjvsNsFPyu-SM6HeEgZ-GRvi6PJ_iANBoC3ezw_wcB&gclsrc=aw.ds, 1. September 2016.
- [ISS14] Isnaini, M. M.; Sato, R.; Shirase, K.: Workpiece Setup Simulation based on Machinable Space of Five-axis Machining Centers. In: *Procedia CIRP*, 23.–25. Juni 2017, Berkeley, Ca, USA, Elsevier, 14, 2014, S. 257–262.
- [Jur16] Jurke, B.: *Projektvorstellung Innovationsprojekt – Intelligente Arbeits-Vorbereitung auf Basis virtueller Werkzeug-Maschinen*, 16. Juni 2016, Bielefeld, 2016.

²⁴³ Diese Referenz verweist auf die Software Gurobi, Solver.

- [JWB05] Jönsson, A.; Wall, J.; Broman, G.: A virtual machine concept for real-time simulation of machine tool dynamics. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45/7-8, 2005, S. 795–801.
- [Kat16] Katalinic, B.: *Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium 2016*. DAAAM International, 21.–24. Oktober 2015, Zadar, Kroatien, Wien, 2016, S. 948–954..
- [KeEb01] Kennedy, J.; Eberhart, R.: *Swarm intelligence*, Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA, 2001.
- [KeEb95] Kennedy, J.; Eberhart, R.: *Particle Swarm Optimization*. In: *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, 27. November – 01. Dezember 1995, the University of Western Australia, Perth, Australia, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, USA, 1995.
- [KiRo11] Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.: *CNC-Handbuch 2011/12 – CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Simulation, Fachwortverzeichnis*, C. Hanser Verlag, München, 2011.
- [KLB+99] Kruth, J. P. et al.: *NC-Postprocessing and NC-Simulation for Five-Axis Milling Operations with Automatic Collision Avoidance*. In: *Journal for Manufacturing Science and Production*, 2/4, 1999, S. 207–216.
- [KLT01] Kreppenhof, D.; Lang, R.; Tassi, E.: *Wissensbasierte Technologieplanung durch automatische Objekt- und Merkmalerkennung*. In: *wt Werkstatttechnik online*, 91/03-2001, 2001, S. 127–131.
- [KoRi09] Koch, M.; Richter, A.: *Enterprise 2.0. Planung, Einführung und erfolgreicher Einsatz von Social Software in Unternehmen*, Oldenbourg, München, 2. Auflage, 2009.
- [Kou91] Kouvelis, P.: *An optimal tool selection procedure for the initial design phase of a flexible manufacturing system*. In: *European Journal of Operational Research*, 55/2, 1991, S. 201–210.
- [KPJ+16] Kosler, H.; Pavlovčič, U.; Jezeršek, M.; Možina, J.: *Adaptive Robotic Deburring of Die-Cast Parts with Position and Orientation Measurements Using a 3D Laser-Triangulation Sensor*. In: *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 62/4, 2016, S. 207–212.
- [Küh06] Kühn, W.: *Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner*, Carl Hanser Verlag, München, 2006.
- [LaKe91] Law, A. M.; Kelton, D. W.: *Simulation Modelling and Analysis*, McGraw-Hill, Boston, New York, San Francisco, St. Louis, 1991.
- [Lan16-ol] Lang, A.: *cnc-nc*. Unter: www.cnc-nc.de, 30. Oktober 2016.
- [Lan65] Langheinrich, G.: *Die Vorkalkulation für Arbeiten auf Revolverdrehbänken*, Carl Hanser Verlag, München, 1965.
- [Lar07] Laroque, C.: *Ein mehrbenutzerfähiges Werkzeug zur Modellierung und richtungsoffenen Simulation von wahlweise objekt- und funktionsorientiert gegliederten Fertigungssystemen*. Dissertation, Wirtschaftsinformatik, insb. CIM, Universität Paderborn, Paderborn, 2007.
- [LDK03] Lauwers, B.; Dejonghe, P.; Kruth, J. P.: *Optimal and collision free tool posture in five-axis machining through the tight integration of tool path generation and machine simulation*. In: *Computer-Aided Design*, 35/5, 2003, S. 421–432.
- [LeRe11] Lee, R. S.; Ren, M. K.: *Development of Virtual Machine Tool for Simulation and Evaluation*. In: *Computer-Aided Design and Applications*, 8/6, 2011, S. 849–858.

- [LKD+00] Lauwers, B.; Kruth, J.-P.; Dejonghe, P.; Vreys, R.: Efficient NC-Programming of Multi-Axes Milling Machines Through the Integration of Tool Path Generation and NC-Simulation. In: CIRP Annals – Manufacturing Technology, 49/1, 2000, S. 367–370.
- [LKM+99] Larrañaga, P.; Kuijpers, C. M. H.; Murga, R. H.; Inza, I.; Dizdarevic, S.: Genetic Algorithms for the Travelling Salesman Problem – A Review of Representations and Operators. In: Artificial Intelligence Review, 13/2, 1999, S. 129–170.
- [LLS10] Laudon, K. C.; Laudon, J. P.; Schoder, D.: Wirtschaftsinformatik – Eine Einführung, Pearson Verlag, München, 2. Auflage, 2010.
- [LUE10] Laroque, C.; Urban, B.; Eberling, M.: Parameteroptimierung von Materialflusssimulationen durch Partikelschwarmalgorithmen. Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2010, 23.–25. Februar 2010, Göttingen, Kurzfassungen der Beiträge MKWI 2010, Göttingen, 2010.
- [LüSc14] Lüder, A.; Schmidt, N.: AutomationML – Erreichtes und Zukünftiges. Serie AutomationML Teil 13: Der Stand dessen, was erreicht wurde, und die weiteren Entwicklungsschritte. In: SPS-MAGAZIN, Fachzeitschrift für Automatisierungstechnik, 1+2, 2014; S. 38–40.
- [Mac17-ol] N. N.: MachineWorks – CNC Simulation & Verification Software. Unter: <http://www.machineworks.com/>, 12. April 2017.
- [Mac17a-ol] Macaulay, T.: Nine of the best enterprise collaboration software tools – Slack, Workplace, Microsoft Teams and more. Unter: <http://www.computerworlduk.com/galleries/applications/9-best-enterprise-collaboration-software-tools-slack-sharepoint-more-3648569/>, 10. April 2017.
- [Mah10] Mahnken, R.: Lehrbuch der Technischen Mechanik – Dynamik, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Mak16-ol] Makowski, D.: Winhistory.de – Alte Preise für Hardware. Unter: <http://winhistory.de/more/386/altepreise.htm>, 1. September 2017.
- [MaKh99] Mandviwalla, M.; Khan, S.: Collaborative Object Workspaces (COWS): exploring the integration of collaboration technology. In: Decision Support Systems, 27/3, 1999, S. 241–254.
- [Man10] Mann, S.: Microsoft SharePoint server 2010 bible – Includes index, Wiley Pub, Indianapolis, IN, USA, 2010.
- [Mar14] Martensen, M.: Einsatz von Social Software durch Unternehmensberater – Akzeptanz, Präferenzen, Nutzungsarten, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [MAT15] N. N.: MATLAB. The MathWorks, Inc., The MathWorks GmbH, 2015.²⁴⁴
- [McA16-ol] McAfee, A.: Enterprise 2.0, version 2.0. Unter: http://andrewmcafee.org/2006/05/enterprise_20_version_20/, 28. Juni 2016.
- [MeSu09] Mellouli, T.; Suhl, L.: Optimierungssysteme, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2. Auflage, 2009.
- [Mik03a] Miksch, A.: Werkzeugwechsellvorrichtung. Gewerbliches Schutzrecht, DE10354441B4, Anmeldejahr 2003, Publikationsjahr 2006, Göppingen.
- [Mik03b] Miksch, A.: Werkzeugwechselsystem. Gewerbliches Schutzrecht, DE10354442B4, Anmeldejahr, 2003, Publikationsjahr 2006, Göppingen.

²⁴⁴ Diese Referenz verweist auf die Software MATLAB.

- [Mik16-ol] N. N.: Schnittparameter für das Produkt „CrazyDrill Flexpilot Steel“ – Mikron Tool. Unter: <https://www.mikrontool.com/de/Produkte/CrazyDrill-Flexpilot/Technische-Infos/Schnittparameter>, 30. Oktober 2016.
- [Mit98] Mitchell, P.: Material and part handling in manufacturing – Reference book for manufacturing engineers, managers, and technicians. Society of Manufacturing Engineers, Tool and manufacturing engineers handbook Band 9, Dearborn, MI, USA, 4. Auflage, 1998.
- [MKR+11] März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G.: Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik – Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen, Springer Verlag, VDI-Buch, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Mon13] Montgomery, D. C.: Design and analysis of experiments. Wiley, Hoboken, NJ, USA, 8. Auflage, 2013.
- [MTE+14] Micka, W.; Trantopoulos, M.; Elborg, T.; Keilholz, S.; de Maddalena, M.: Microsoft SharePoint 2013 für Administratoren – das Handbuch, Microsoft Press; O'Reilly, Unterschleißheim, Köln, 2014.
- [MuZi05] Munkvold, B. E.; Zigurs, I.: Integration of E-Collaboration Technologies. In: International Journal of e-Collaboration, 1/2, 2005, S. 1–24.
- [MWR+16] Mueß, A.; Weber, J.; Reisch, R.-E.; Jurke, B.: Implementation and Comparison of Cluster-Based PSO Extensions in Hybrid Settings with Efficient Approximation. In: Niggemann, O.; Beyrer, J. (Hrsg.): Machine Learning for Cyber Physical Systems, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2016; S. 87–93.
- [NCSimul17-ol] N. N.: NC SIMUL Solutions. Unter: <https://www.ncsimul.com/de/contenu.php?ID=75>, 01. September 2017.
- [Neu12] Neugebauer, R.: Werkzeugmaschinen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1. Auflage, 2012.
- [NoSp13] Noel, M.; Spence, C.: SharePoint 2013 unleashed, Sams, Indianapolis, IN, USA, 1. Auflage, 2013.
- [Nyh88] Nyhuis, P.: Maßnahmen zur Rüstzeitverkürzung – Bekannte Ansätze – Systematische Vorgehensweise zur Maßnahmenfindung. AWF-Fachtagung Rüstzeitverkürzung, 20.–21. September 1988, Bad Soden, S. 20–42.
- [NYN+13] Nugroho, K.; Yahya, A.; Nor, L. S. H.; Daud, Md R.; Khamis, N. H. H.; Khalil, K.; Rahim, M. A. A.; Baharom, A.: Investigation of Workpiece Positioning Methods for Machining Oil-Pocket on Hip-Implant Spherical Surface. In: Key Engineering Materials, 594–595, 2013, S. 535–539.
- [O'Rei05-ol] O'Reilly, T.: What Is Web 2.0. Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software. Unter: <http://www.oreilly.com/pub/a/web2/archive/what-is-web-20.html>, 5. November 2016.
- [O'Rei07-ol] O'Reilly, T.: What Is Web 2.0: Design Patterns and Business Models for the Next Generation of Software. In: International Journal of Digital Economics, communication & strategies, 65, MPRA, 2007, S. 17–37.
- [PaGr15] Pajor, M.; Grudziński, M.: Intelligent Machine Tool – Vision Based 3D Scanning System for Positioning of the Workpiece. In: Solid State Phenomena, 220–221, 2015, S. 497–503.
- [PHG+12] Penedo, F.; Haber, R. E.; Gajate, A.; del Toro, R. M.: Hybrid Incremental Modeling Based on Least Squares and Fuzzy K-NN for Monitoring Tool Wear in Turning Processes. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, 8/4, 2012, S. 811–818.
- [Pia11] Pialorsi, P.: Microsoft SharePoint 2010 – Das Entwicklerbuch, Microsoft Press, Unterschleißheim, 2011.

- [PKW+13] Pürzel, F.; Klimant, P.; Wittstock, V.; Kuhl, M.: Real NC Control Unit and Virtual Machine to Improve Operator Training. In: *Procedia Computer Science*, 25, Elsevier, 2013, S. 98–107.
- [PLS+13] Pessoles, X.; Landon, Y.; Segonds, S.; Rubio, W.: Optimisation of workpiece setup for continuous five-axis milling – Application to a five-axis BC type machining centre. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65/1-4, 2013, S. 67–79.
- [Pop01] Popp, K. J.; Merk, R.: Vorrichtung zum automatischen Werkzeugwechsel. Gewerbliches Schutzrecht, DE10144775B4, Anmeldejahr 2001, Publikationsjahr 2005, Augsburg, Lemmerdingen, Salach.
- [RaAd96] Rajamani, D.; Adil, G. K.: Machine loading in flexible manufacturing systems considering routing flexibility. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 11/5, 1996, S. 372–380.
- [Rea08-ol] N. N.: Real NC. NC-Simulation und Optimierung, Tecnomatix. Produktübersicht Siemens PLM Software, Köln, 2008.
- [REFA58] Böhrs, H.; Euler, H.; Ernst, A.; Heck, F.; Thibaut, R.; Winkel, A. (Mrb): Das REFA-Buch – Zeitvorgabe, Carl Hanser Verlag, München, 1958.
- [Rex02-ol] N. N.: MTC200/ISP200/MTA200/TRANS200 – MTGUI User Interface, 2002. Unter: <http://www.boschrexroth.de/>, 30. Oktober 2016.
- [Rhi17-ol] N. N.: RhinoCAM 2017 – Computer Aided Manufacturing inside Rhino, MecSoft Corp. Unter: <https://mecsoft.com/rhinocam-software/>, 10. April 2017.
- [Ric10] Richter, A.: Der Einsatz von Social Networking Services in Unternehmen – Eine explorative Analyse möglicher soziotechnischer Gestaltungsparameter und ihrer Implikationen, Gabler Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 1. Auflage, 2010.
- [RNS94] Rembold, U.; Nnaji, B. O.; Storr, A.: CIM Computeranwendungen in der Produktion, Addison-Wesley, Bonn, 1. Auflage, 1994.
- [Rol12-ol] Rolletschek, K.: Microsoft SharePoint Designer 2010 – Das Praxisbuch für Anwender und Designer, ppedv, Burghausen, 1. Auflage, 2012. Unter: http://www.sharepointkonferenz.de/SharePoint_Designer2010.pdf, 2. September 2017.
- [RRB11] Richter, D.; Riemer, K.; vom Brocke, J.: Internet Social Networking. In: *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, 53/2, 2011, S. 89–103.
- [RWL+15] Reisch, R.-E.; Weber, J.; Laroque, C.; Schröder, C.: Asynchronous Optimization Techniques for Distributed Computing Applications. *Proceedings of 48th Annual Simulation Symposium (ANSS 2015) 2015 Spring Simulation Multi-Conference (SpringSim'15)*, 12.–15. April 2015, Alexandria, VA, USA, S. 49–56. In: Tolk, A.; Padilla, J. J.; Jafer, S.: *Proceedings of the 2015 Spring Simulation Multi-Conference*, Alexandria, VA, USA.
- [SAC08] Sencer, B.; Altintas, Y.; Croft, E.: Feed optimization for five-axis CNC machine tools with drive constraints. In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48/7-8, 2008, S. 733–745.
- [SAK90] Spence, A.; Altintas, Y.; Kirkpatrick, D.: Direct calculation of machining parameters from a solid model. In: *Computers in Industry*, 14/4, 1990, S. 271–280.
- [Sch06] Schmidt, J.: Social Software: Onlinegestütztes Informations-, Identitäts- und Beziehungsmanagement – Neue Bewegung im Internet? In: *Forschungsjournal Neue Soziale Bewegung*, 19 02-06, 2006, S. 37–47.
- [Sch92] Schrüfer, N.: Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung. *Forschungsberichte 48*, iwv TU München, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992.

- [ScLü15] Schmidt, N.; Lüder, A.: AutomationML – The Glue for Seamless Automation Engineering – AutomationML in a Nutshell, AutomationML e.V. (<https://www.automationml.org/o.red.c/home.html>, 21. August 2017), Magdeburg, 2015.
- [ScWe07] Schneider, U.; Werner, D.: Taschenbuch der Informatik – Mit 108 Tabellen, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 6. Auflage, 2007.
- [ScZe03] Schmidt, D.; Zeiff, A.: CNC-Werkstückpositionierung spart Rüstzeit und Lagerkosten – Einfache Vermessung. In: *Quality Engineering*, 3, 2003, S. 24–25.
- [Set16-ol] N. N.: SETI@home. Unter: <http://setiathome.berkeley.edu/index.php>, 2. September 2016.
- [Shi02] Shirinzadeh, B.: Flexible fixturing for workpiece positioning and constraining. In: *Assembly Automation*, 22/2, 2002, S. 112–120.
- [Sin06] N. N.: Sinumerik: SINUMERIK 840D sl/840Di sl/840D/840Di/810D Grundlagen – Programmierhandbuch, Siemens AG, 11/06, Nürnberg, 2006.
- [Sin13] N. N.: Sinumerik: SINUMERIK 840D sl / 828D Arbeitsvorbereitung – Programmierhandbuch, Siemens AG, 03/13, Nürnberg, 2013.
- [SLS+99] Storr, A.; Lutz, R.; Seyfarth, M.; Weiner, M.: Softwaretechnik und CASE-Tools für Steuerungssoftware. ISW Steuerungstechnische Kolloquium 25.–26. Februar 1999, Stuttgart, Selbstverlag FISW 1999, 6, Stuttgart, 1999.
- [Sta06] Stautner, M.: Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung. Dissertation, Institut für spanende Fertigung, TU Dortmund, Dortmund, 2005, Vulkan-Verlag, Essen, 2006.
- [Sta17-ol] N. N.: Konfidenzintervalle für den Mittelwert. Statistica. Unter: <http://www.statsoft.de/> und <https://www.statsoft.de/glossary/C/ConfidenceIntervalfortheMean.htm>, 2. September 2017.
- [Ste83] Stecke, K. E.: Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems. In: *Management Science*, 29/3, 1983, S. 273–288.
- [StJä08a] Stegbauer, C.; Jäckel, M.: Social Software, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2008.
- [StJä08b] Stegbauer, C.; Jäckel, M.: Social Software – Herausforderungen für die medien-soziologische Forschung, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2008.
- [StTo10] Stocker, A.; Tochtermann, K.: Wissenstransfer mit Wikis und Weblogs, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2010.
- [SuMe13] Suhl, L.; Mellouli, T.: Optimierungssysteme, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 3. Auflage, 2013.
- [Sur06] Surmann, T.: Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsige Fräsen von Freiformflächen. Dissertation, Institut für spanende Fertigung, TU Dortmund, Dortmund, 2005, Vulkan-Verlag, Essen, 2006.
- [TaDe88a] Tang, C. S.; Denardo, E. V.: Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part I: Minimization of the Number of Tool Switches. In: *Operations Research*, 36/5, 1988, S. 767–787.
- [TaDe88b] Tang, C. S.; Denardo, E. V.: Models Arising from a Flexible Manufacturing Machine, Part II: Minimization of the Number of Switching Instants. In: *Operations Research*, 36/5, 1988; S. 778–785.
- [Tan94] Tanchoco, J. M. A.: Material Flow Systems in Manufacturing, Springer US, Boston, MA, USA, 1. Auflage, 1994.

- [Thy11-ol] N. N.: ThyssenKrupp Materials International – Werkstoffdatenblatt E355. Unter: http://www.s-k-h.com/media/de/Service/Werkstoffblaetter_deutsch/Dickwand__Hohlprofile/E355.pdf, 2. September 2017.
- [TIB17-ol] N. N.: CNC-Simulator. Unter: http://www.tibek.de/cnc-simulator_de.html, 2. September 2017.
- [Tys00] Tysiak, W.: Einführung in die Fertigungswirtschaft – Mit 79 Tabellen, 72 Übungen sowie einem Glossar, Carl Hanser Verlag, München, 2000.
- [VDI2852] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (ADB), Fachbereich Produktionsanlagen: Kenngrößen numerisch gesteuerter Fertigungseinrichtungen – Span-zu-Span-Zeit bei automatischem Werkzeugwechsel, VDI Richtlinie, Blatt 1, Beuth Verlag GmbH; VDI-Verlag GmbH, Berlin, Köln, Düsseldorf, 1984.
- [VDI2861] Verein Deutscher Ingenieure: Montage- und Handhabungstechnik – Kenngrößen für Industrieroboter, Einsatzspezifische Kenngrößen, VDI-Richtlinie, Blatt 2, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1988.
- [VDI3363] Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (GPL), Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme – Grundlagen, VDI-Richtlinie, Blatt 1, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Düsseldorf, 2010.
- [VREP16-ol] N. N.: V-Rep – Virtual robot experimental platform, Coppelia Robotics GmbH, 2016. Unter: <http://www.coppeliarobotics.com/>, 1. September 2017.
- [VUB92] Veeramani, D.; Upton, D. M.; Barash, M. M.: Cutting-tool management in computer-integrated manufacturing. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 4/3-4, 1992, S. 237–265.
- [WBD14] Weber, J.; Boxnick, S.; Dangelmaier, W.: Experiments using meta-heuristics to shape experimental design for a simulation-based optimization system – Intelligent configuration and setup of virtual tooling, 2014 Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering (APWC on CSE), 4.–5. November 2014, IEEE, Nadi, Fiji, 2014, S. 312–319.
- [WCF16-ol] N. N.: Windows Communication Foundation (WCF). Unter: <https://msdn.microsoft.com/de-de/vstudio/aa663324.aspx>, 2. September 2017.
- [Web15] Weber, J.: A Technical Approach of a Simulation-Based Optimization Platform for Setup-Preparation via Virtual Tooling by Testing the Optimization of Zero Point Positions in CNC-Applications. WSC 2015, 6.–9. Dezember 2015, Huntington Beach, CA, USA, 2015. In: Yilmaz, L.; Chan, W. K. V.; Moon, I.; Roeder, T. M. K.; Macal, C.; Rossetti, M. D.: Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference, Huntington Beach, CA, USA, 2015.
- [Web17] Weber, Jens: A Multi-user-collaboration Platform Concept for Managing Simulation-Based Optimization of Virtual Tooling as Big Data Exchange Service. In: Jung, J. J.; Kim, P. (Hrsg.): Big Data Technologies and Applications (LNICST), Springer International Publishing, 194, Cham, Schweiz, 2017, S. 144 – 153.
- [WeBe91] Weck, M.; Bey, I.: Simulation in CIM. Leitfaden zum Erfolg, Springer Verlag, Berlin, 1991.
- [WeBr05a] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 1, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [WeBr06b] Weck, M.; Brecher, C.: Werkzeugmaschinen 4, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
- [Wei11] Weißenborn, J.: Schnittstelle DMG Virtual Machine – Spezifikation VMDE-Dateiformat, Bielefeld/Pfronten, 2011.

- [WeLa17] Weber, J.; Laroque, C.: A Concept to Combine PSO with Industrial Tooling Machine Setup Issues as Practical Approach for Simulation Based Optimization. The 12th edition of the Metaheuristics International Conference (MIC 2017), 4.–7. Juli 2017, Barcelona, Spanien, S. 753–755.
- [Wic14-ol] Wichert, O.: Lean Production Expert. Unter: <http://www.lean-production-expert.de/lean-production/taktzeitdiagramm.html>, 2. September 2017.
- [Wit86] Witte, H.: Werkzeugmaschinen – Grundlagen und Prinzipien in Aufbau, Funktion, Antrieb und Steuerung spangebender Werkzeugmaschinen, Vogel, Würzburg, 5. Auflage, 1986.
- [WNM+99a] Wu, C.-Y.; Neal, G. L.; de Meter, E. C.; Trethewey, M. W.; Rao, S. B.: Global Workpiece Positioning System (GWPS) Part 1: Concept and Development of a Laser Probe Based System. In: Journal of Manufacturing Systems, 18/6, 1999, S. 431–446.
- [WNM+99b] Wu, C.-Y.; Neal, G. L.; de Meter, E. C.; Trethewey, M. W.; Rao, S. B.: Global workpiece positioning system (GWPS) Part 2: Development of an ultrasonics-based system. In: Journal of Manufacturing Systems, 18/6, 1999, S. 447–459.
- [WRS+16] Weber, J.; Reisch, R.-E.; Schröder, C.; Laroque, C.: Setup Optimization Based on Virtual Tooling for Manufacturing in Order to Provide an Intelligent Work Preparation Process. WSC 2016, 11.–14. Dezember 2016, Arlington, VA, USA, 2016. In: Roeder, T. M. K.; Frazier, P. I.; Szechtman, R.; Zhou, E.; Huschka, T.; Chick, S. E.: Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, Arlington, VA, USA, 2016.
- [WWL+01] Wang, Z.; Wang, Z.; Liu, W.; Lei, Y.: A study on workspace, boundary workspace analysis and workpiece positioning for parallel machine tools. In: Mechanism and Machine Theory, 36/5, 2001, S. 605–622.
- [YAE06] Yeung, C.-H.; Altintas, Y.; Erkorkmaz, K.: Virtual CNC system – Part I: System architecture. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46/10, 2006, S. 1107–1123.
- [YiHu04] Yip-Hoi, D.; Huang, X.: Cutter Engagement Feature Extraction From Solid Models for End Milling. ASME 2004 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Manufacturing Engineering and Materials Handling Engineering, 13.–19. November 2004, Anaheim, CA, USA, ASME, S. 339–349.
- [ZhCh09] Zhang, J. Z.; Chen, J. C.: Surface Roughness Optimization in a Drilling Operation Using the Taguchi Design Method. In: Materials and Manufacturing Processes, 24/4, 2009, S. 459–467.
- [ZaWa14] Zaki, M. J.; Wagner Jr., M.: Data mining and analysis – Fundamental concepts and algorithms, Cambridge Univ. Press, New York, NY, USA, 2014.

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut neun Professoren mit insgesamt 150 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 20 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the University of Paderborn. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: En route to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow’s economy.

Today nine Professors and 150 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 20 young researchers receive a doctorate.